韓國水資源學會論文集
第47卷 第10號·2014年 10月
pp. 921~934

J. KOREA WATER RESOURCES ASSOCIATION
Vol. 47, No. 10:921-934, October 2014
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2014.47.10.921
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

저수지 수위 구간별 운영률의 구간 경계 도출을 위한 집합체 혼합진화 알고리즘의 적용

Application of the SCE-UA to Derive Zone Boundaries of a Zone Based Operation Rule for a Dam

강 신 욱* / 강 태 욱** / 이 상 호***
Kang, Shinuk / Kang, Taeuk / Lee, Sangho

Abstract

The purpose of the study is to derive a long term reservoir operation method that is easy to understand and apply to practical use for dam operators. The zone based operation rule is a simple method to make operation decisions by criteria corresponding to storage zones. The reservoir storage levels dividing a reservoir, however, must be determined by some methods. We developed a reservoir operation model based on the zone based operation rule and the shuffled complex evolution algorithm (SCE-UA) was used to determine storage levels for zone division. The model was applied to Angat Dam in the Philippines that has trouble in water supply due to imbalance between supply and demand. We derived a zone based operation rule for Angat Dam and applied it to the reservoir simulation of Angat Dam using the historical inflow. The simulation results showed water supply deficit and power generation were improved by 34.5% and 21.2%, respectively, when compared with the historical records. The current study results may be used to derive a long term reservoir operation rule.

keywords : reservoir operation, zone based operation rule, SCE-UA, Angat Dam

요 지

본 연구의 목적은 댐 관리자가 쉽게 이해할 수 있고, 실제 댐 운영 업무에 적용하기 쉬운 저수지 운영률을 도출하는 것이다. 수위 구간별 저수지 운영률은 현재의 저수지 수위가 위치하는 영역의 운영 기준에 따라 저수지를 운영하는 간단한 방법이지만, 구체적인 수위 구간의 설정이 필요한 방법이다. 이에 연구에서는 수위 구간별 운영률을 포함한 저수지 운영 모형을 개발하였고, 수위 구간별 운영률의 적절한 수위 구간을 결정하기 위해 집합체 혼합진화 알고리즘을 이용하였다. 개발된 저수지 운영 모형을 물 수급 불균형으로 인해 물 공급에 어려움을 겪고 있는 필리핀의 Angat 댐에 대하여 적용하여 수위 구간별 운영률을 도출하고, 그에 따라 기록 유입량 자료를 이용하여 Angat 댐을 모의 운영하였다. 그 결과, 모의 운영을 통해 결정된 계획 공급량 대비 용수공급 부족량과 발전량은 실제 운영 기록에 비해 각각 34.5%와 21.2% 개선되었다. 본 연구의 결과는 댐의 장기 운영률 유도에 활용되어질 수 있을 것이다.

핵심용어 : 저수지 운영, 수위 구간별 운영률, 집합체 혼합진화 알고리즘, Angat 댐

* K-water K-water연구원 책임연구원 (e-mail: sukang@kwater.or.kr)
Senior Research Engineer, K-water Research Institute, K-water, Daejeon 305-730, Korea
** K-water K-water연구원 위촉선임연구원 (e-mail: ktw62@hanmail.net)
Postdoctoral Research Associate, K-water Research Institute, K-water, Daejeon 305-730, Korea
*** 교신저자, 부경대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: peterlee@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-6076)
Corresponding Author, Prof., Dept. of Civil Engrg., Pukyong National Univ., Busan 608-737, Korea

1. 서 론

댐의 기능은 홍수조절과 각종 용수공급, 수력발전, 내륙주운, 하천환경 보존을 위한 적정 하천유량의 유지 등이 주를 이룬다. 그리고 호소와 하천 수변공간 조성을 통한 여가 및 휴식공간의 기능도 강조되고 있다. 하지만 우리나라의 경우에 이미 현실로 닥친 물 부족과 수질오염을 둘러싼 유역 상·하류 지역 간의 갈등 및 물 분쟁 등으로 우리 정부와 국민이 부담해야 하는 사회적 비용은 막대함에도 불구하고 수자원의 구조적인 추가 확보는 갈수록 어려워지고 있다. 따라서 기 확보된 수자원 시설물을 최대한 활용하기 위한 보다 과학적인 저수지 운영 기술이 절실히 요구된다(Ko and Chung, 2002).

저수지 운영의 궁극적인 목표는 댐의 건설 목적에 따라 매시간 유입량과 저수량을 감안하여 적절한 방류를 수행하는 것이다. 적절한 방류를 행하는 것은 수자원 시스템 관리의 관점에서 선정된 운영 기준에 가장 적합한 유량을 방류하는 것이므로 운영 기준을 어떻게 결정하는가에 따라 저수지 운영 방안이 달라진다. 저수지 운영 방안을 목적에 따라 구분하면 크게 두 가지로 구분되는데, 하나는 이수 목적의 용수공급을 위한 운영 방안이고 다른 하나는 치수 목적의 홍수조절을 위한 운영 방안이다. 또한, 저수지 운영 방안을 분석기간에 따라 분류하면 중장기 운영 방안과 단기 운영 방안으로 구분할 수 있는데, 용수의 안정공급 방안은 대개 중장기 운영 방안이고, 실시간 저수지 운영이 단기 운영방안에 해당된다(Kim, 1988). 본 연구는 댐의 안정적 용수공급을 위한 장기 운영 방안에 대한 내용을 다루고 있다.

저수지 또는 저수지군(reservoir system)의 효과적 운영을 위해 지난 수십 년간 전 세계적으로 수많은 연구들에서 최적화 방법을 적용하였다(Hiew, 1987; Hiew et al., 1989; Tejada-Guibert et al., 1990; Trezos, 1991; Raman and Chandramouli, 1996; Needham et al., 2000; Chen, 2003). 또한 우리나라에서도 1980년대부터 최적화 기법에 의한 저수지 최적 운영을 위한 연구가 여러 차례 시도되었다(Kwon and Seong, 1980; Oh and Lee, 1986; Ko et al., 1992; 1997; Yoo, 2000; Cheong et al., 2008; Eum and Park, 2010). 그러나 Yeh (1985)와 Wurbs (1993) 등과 같은 여러 연구자들은 이론적인 개발과 실제 적용은 많은 격차가 있음을 지적하였다. 이러한 격차에 대한 원인은 저수지 운영자의 경험 배제(排除), 연구결과를 실제 적용하여 사용하기 어려움 등이다(Labadie, 2004; Yeh, 1985). 이러한 이유에서 댐 운영자가 과학적이면서도 쉽게 적용할 수 있는 운영 방안이 필요하다. 부연하면 댐 운영자가 실용적으로 장기 저수지 운영계획을 수립하고 운영하기 위해서는 수학적 이론과 더불어 운영자의 다년간 경험을 포함하고 직관적으로 이해할 수 있는 방법론이 필요하다.

본 논문의 목적은 댐 관리자가 이해하기 쉽고 사용하기 쉬운 장기 저수지 운영 방안을 개발하고자 하는 것이다. 이를 위해 연구에서는 U.S. Army Corps of Engineers (1977; 1996)에 의해 제시된 수위 구간별 저수지 운영률(zone-based operation rule)을 활용하였다. 그리고 해당 운영률에서 저수지 운영의 기준이 되는 수위 구간을 적절히 구분하기 위해 Duan (1991)이 개발한 전역최적화 알고리즘인 집합체 혼합진화(shuffled complex evolution-University of Arizona; SCE-UA) 알고리즘을 이용하였다. 연구에서 활용한 대상 댐은 용수공급 부족이 심각한 필리핀의 Angat 댐이며, 신뢰적인 결과를 도출하기 위해서는 장기간의 댐 유입량이 확보되어야 하므로 과거 Angat 댐 유입량 자료를 이용하여 500년 간 유입량을 모의 발생시켰다. 연구에서는 Angat 댐에 대하여 도출된 수위 구간별 저수지 운영률을 해당 운영률에 따라 수행된 모의 운영 결과와 실제 댐 운영 기록을 비교하여 적절성을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 수위 구간별 저수지 운영률

2.1.1 장기 저수지 운영률

장기 저수지 운영이란, 월(月)과 같이 비교적 긴 기간 단위로 댐 운영의 목표를 달성하기 위해 댐 운영 시점의 저류량과 유입량을 고려하여 물을 공급하는 것이다. 이때 댐의 운영 상황에 맞게 공급량을 적절하게 결정하는 기준이 저수지 운영률이다. 일반적으로 장기 저수지 운영을 위한 저수지의 운영률은 표준 운영률(standard operating policy; SOP), 예비 제한 운영률(hedging rule), 가치 증대 운영률(pack rule), 수위 구간별 운영률 등이 있다(U.S. Army Corps of Engineers, 1996).

표준 운영률은 가장 단순한 저수지 운영 방법으로서 가능한 한 목표 수요량에 맞추어 공급하는 방법이다. 예비 제한 운영률은 저수지 운영 중 향후에 심각한 물 부족의 가능성을 줄이기 위하여 현재의 부족을 감수하는 운영 방식이다. 예비 제한 운영률이 장래의 물 부족에 대비한 운영률임에 반해, 가치 증대 운영률은 목표 방류량을 초과하는 양을 방류할 때 2차 발전, 용수공급, 수질오염 조절, 지하수 함양 등과 같은 가치를 고려하는 운영률이다. 그러나 수문정보의 불확실성 등으로 유입량이 예측값보다 작을

수도 있으므로 신중히 적용하여야 한다. 수위 구간별 운영률은 저수지를 다수의 영역(zone)으로 구분하여, 현재의 저수지 수위가 위치하는 영역의 운영 기준에 따라 저수지를 운영한다. 이때 저수지의 운영은 현재의 저수용량과 부가적인 변수에 따라 결정된다(U.S. Army Corps of Engineers, 1977).

2.1.2 수위 구간별 저수지 운영률

본 연구에서 대상으로 하는 저수지 운영 방법은 수위 구간별 운영률이다. 수위 구간별 운영률을 적용하기 위해서는 저수지의 저류공간을 몇 개의 구간으로 구분해야 한다. 본 연구에서는 수위 구간별 운영률 결정을 위해 Fig. 1의 예시와 같이 저수지를 5 개의 수위와 6 개의 운영 영역으로 구분하였다. Fig. 1에서 Zone (6)과 Zone (1)을 각각 정의하는 최대 수위(Max. level)와 최소 수위(Min. level)는 각각 댐 마다 설정되어 있는 상시만수위(홍수기 제한수위)와 저(低)수위로 하였다. 그리고 상시만수위와 저(低)수위 사이의 공간을 상위(upper), 중간(middle), 하위(lower) 수위로 구분하였다. 따라서 구분된 상·중·하위 수위에 따라 운영 영역 Zone (2)~(5)가 결정된다.

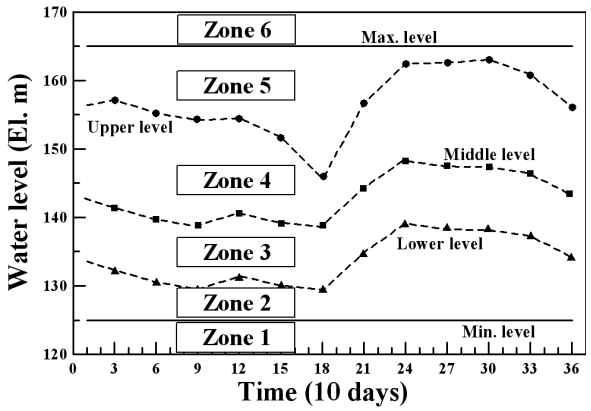


Fig. 1. An Example of Reservoir Operation Zones according to Water Levels

수위 구간별 저수지 운영률에서는 현재 상태의 저수위와 예측유입량에 따라 운영 방법이 달라진다. 즉, t시간 初의 저수량(ST_t)와 t시간 동안의 예측유입량($\widehat{QF_t}$)의 합에 상응하는 저수지 수위 조건에 따라 방류량이 결정된다. 연구에서는 Table 1과 같은 수위 구간별 저수지 운영 방안을 수립하였다. 우선, Zone (6)에서는 저수지의 계획된 용수공급량(생활, 공업, 농업용수)을 기본적으로 방류한다. 그리고 최대 발전용수량을 초과하지 않는 범위에서 추가방류를 하고, 나머지 잔여 용수가 있으면 여수로를 통해 방류한다. Zone (6)은 저수량과 유입량의 합이 큰 구간으로 저수지의 안정적 운영을 위해 저수지 수위를 낮추는 영역이다. Zone (5)는 저수지의 계획 용수공급량과 최대 발전용수량 이내에서 추가적인 용수를 공급하는 영역이다. Zone (4)는 평균적인 운영구간으로서 저수지의 계획 용수공급량에 해당하는 수량만을 공급한다. Zone (3)은 평균적인 운영구간보다 낮은 구간으로 초기 가뭄단계에 해당하는 영역이다. 이에 따라 저수지의 전체 계획 용수공급량의 80%만을 공급하여 저수지 수위를 높이도록 설정하였다. Zone (2)는 평균적인 운영에서 벗어나 용수의 부족이 심해지는 구간으로서 계획 용수공급량 중에서 농업용수의 공급을 제외하고, 계획된 생·공용수의 80%만을 공급하도록 설정하였다. Zone (1)은 물이 매우 부족한 기간으로 계획된 생·공용수의 50%만을 공급하여 공급을 제한한다.

본 연구에서 설정한 Zone (1)~(3)의 계획 용수공급량에 대한 제한 공급의 정도에 따라 저수지 운영의 결과가 달라질 수 있다. 이는 댐 운영자의 목적에 맞게 조정이 가능한 인자로서 본 연구에서는 적용 대상 댐인 Angat 댐의 운영자 의견을 반영하여 설정하였다.

Table 1. Water Levels for Reservoir Operation

Predicted water level	Reservoir operation (release)	Zone
Level (ST_t+$\widehat{QF_t}$) > Max. level	- (domestic + industrial + agricultural) × 1.0 - Additional release - Spill	(6)
Up. level ≤ Level (ST_t+$\widehat{QF_t}$) < Max. level	- (domestic + industrial + agricultural) × 1.0 - Additional release	(5)
Mid. level ≤ Level (ST_t+$\widehat{QF_t}$) < Up. level	- (domestic + industrial + agricultural) × 1.0	(4)
Low. level ≤ Level (ST_t+$\widehat{QF_t}$) < Mid. level	- (domestic + industrial + agricultural) × 0.8	(3)
Min. level ≤ Level (ST_t+$\widehat{QF_t}$) < Low. level	- (domestic + industrial) × 0.8	(2)
Level (ST_t+$\widehat{QF_t}$) < Min. level	- (domestic + industrial) × 0.5 If level < low water level then none	(1)

2.2 집합체 혼합진화 알고리즘

2.2.1 집합체 혼합진화 알고리즘의 개요

본 연구에서는 수위 구간별 저수지 운영률의 수위 구간 결정에 집합체 혼합진화 알고리즘을 사용하였다. 자연 진화의 과정을 최적해의 탐색 과정에 도입한 집합체 혼합진화 알고리즘은 Duan (1991)에 의해 개발되고, Duan et al. (1992; 1994) 등 다양한 연구에서 활용된 전역 최적화 알고리즘이다. Duan et al. (1994)에 따르면, 집합체 혼합진화 알고리즘은 다음과 같은 특성을 갖는다. (1) 확정론적이고 확률론적인 접근 방법의 결합(combination of deterministic and probabilistic approaches), (2) 전역해 탐색을 위한 점들로 구성된 집합체의 조직적 진화(systematic evolution), (3) 경쟁적 진화(competitive evolution), (4) 집합체의 혼합(complex shuffling)이다. (1)~(3)에 관한 개념은 기존 연구들에서 성공적임이 입증된 개념이고, (4)의 개념이 Duan et al. (1992)이 제시한 개념이다.

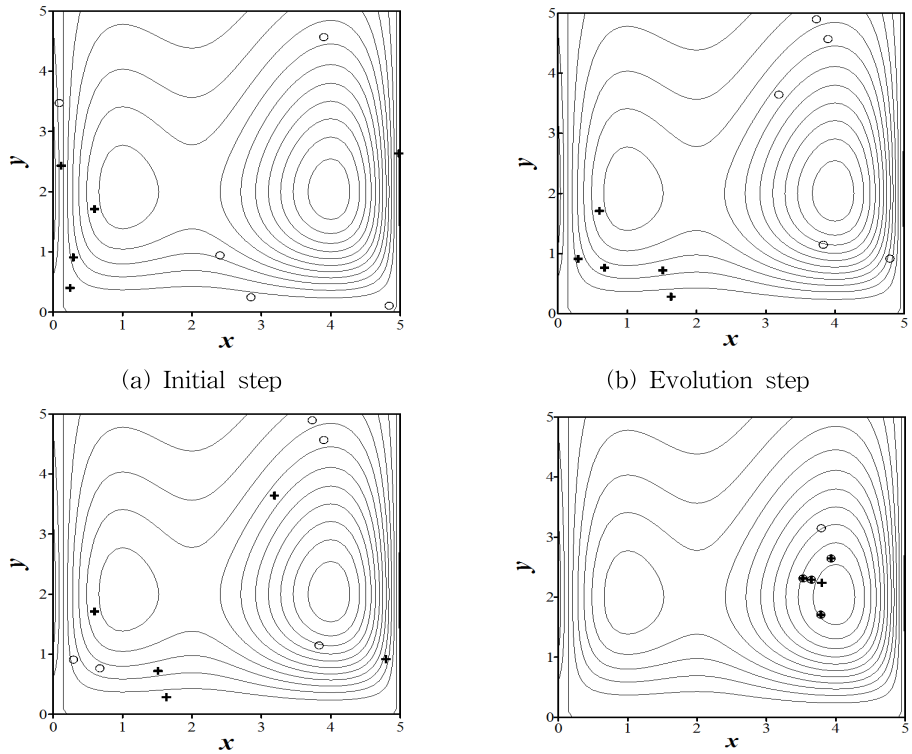
집합체 혼합진화 알고리즘은 개발된 이후, 알고리즘의 효과와 효율이 알려지면서 수자원 분야의 다양한 모형의 자동 보정과 최적화 해석에 관한 연구에서 활용되었다. 실제로 집합체 혼합진화 알고리즘은 미국 국립 기상국의 NWSRFS (National Weather Service river forecasting system)의 보정 모듈로 사용되고 있다(Duan et al., 1994).

2.2.2 집합체 혼합진화 알고리즘의 적용 예

집합체 혼합진화 알고리즘은 최적해(optimal solution)를 탐색하기 위해 s 개의 선정된 점(sampled points)을 이용하여 하나의 모집단(population)을 구성한다. 모집단은 다수의 집합체(p, complex)로 분할되고, 각각의 집합체는 서로 다른 방향의 해 공간을 탐색하여 독립적으로 진화한다. 진화를 거친 집합체는 다시 혼합되고 새로운 집합체들이 생성되며, 진화와 혼합의 과정은 수렴조건이 만족될 때까지 반복된다.

집합체 혼합진화 알고리즘의 최적화 과정을 설명하기 위하여 비교적 간단한 Hosaki 함수(Bekey and Ung, 1974)를 사용하였다. Hosaki 함수는 두 개의 극소값을 가진 함수이며, $x=4$, $y=2$일 때 전역해는 -2.345이다. Hosaki 함수의 전역최적해를 결정하기 위해 목적함수는 함수식을 최소화하는 것으로 하였고, 각 변수에 대한 제약조건의 최대값 및 최소값은 각 정의구역의 최대값 및 최소값으로 하였다.

단계별 최적화 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 집합체 혼합진화 알고리즘은 무작위 표본 형성으로 시작하여, 목적



(a) Initial step (b) Evolution step

(c) Shuffling step (d) Step after 1 iteration

Fig. 2. An Optimization Example of the SCE-UA Algorithm

함수 값의 오름차순으로 표본점들을 배열한 뒤 이를 몇 개의 컴플렉스로 구분한다. Fig. 2(a)에는 표본으로부터 형성한 두 개의 컴플렉스가 각기 원(○)과 십자(+)로 표시되어 있다. 그 후 반사, 확장, 축소, 수축의 진화(evolution) 과정을 통하여 최소값 주변으로 축소된 컴플렉스를 형성한다(Fig. 2(b)). 그 다음 서로 다른 컴플렉스의 점들을 섞어 새로운 컴플렉스를 형성(Fig. 2(c))한 뒤 다시 진화과정을 수행한다. 그 후 진화, 혼합, 진화과정을 차례로 거치면 Fig. 2(d)의 결과를 얻는다. SCE-UA 알고리즘은 이와 같은 반복을 통해 전역최적해를 구한다.

2.3 대상유역과 대상 댐

2.3.1 Angat 댐

본 연구의 대상 댐은 필리핀 불라칸(Bulacan)에 위치하고 있는 Angat 댐이다. Angat 댐의 유역면적은 568 km^2이고, 저수지의 유효 저수용량은 850×10^6 m^3이며 평균 유입량은 71 m^3/s이다. Angat 댐은 1967년에 완공된 댐으로서 수도 마닐라에서 필요한 용수 수요의 약 90%를 공급하고 있고, 주 발전기 4기와 보조 발전기 5기를 통해 246 MW의 시설용량을 갖추어 전력을 생산하고 있다.

Fig. 3은 Angat 댐의 위치를 나타내고, Table 2는 Angat 댐의 저수지와 발전소에 관한 주요 제원을 나타낸다. Angat

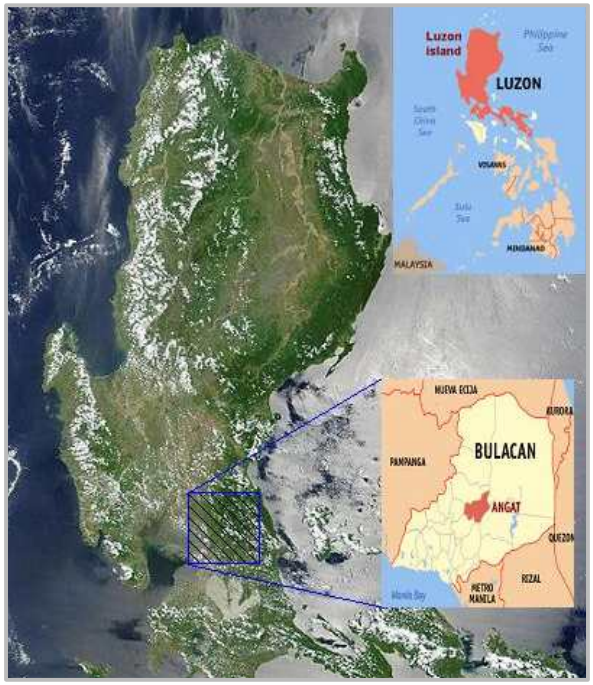


Fig. 3. Location of Angat Dam

Table 2. Specification of Angat Dam

Classification			Unit	Information	Remark	
Dam	Type		-	Rockfill Dam		
	Height		m	131		
	Length		m	568		
	Crest elevation		El. m	221.5		
Reservoir	Basin area		㎢	568		
	Reservoir surface area		㎢	23		
	Flood water level		El. m	219		
	Normal water level		El. m	212		
	Restricted water level		El. m	210	May 1st ~ November 30th	
	Low water level		El. m	160		
	Effective storage capacity		10^6 ㎥	850		
Classification			Occupation	Installed capacity (MW)	Rated head (m)	Max. turbine discharge (㎥/s)
Power generation	Main	Unit 1	K-water	50	132	42.2
		Unit 2		50	132	42.2
		Unit 3		50	132	42.2
		Unit 4		50	132	42.2
	Auxiliary	Unit 1		6	102	6.9
		Unit 2		6	102	6.9
		Unit 3		6	102	6.9
		Unit 4	MWSS	10	102	12.15
		Unit 5		18	102	22.0

댐의 상시 만수위는 El. 212 m이고, 홍수기 제한수위는 5월 1일부터 11월 30일까지 El. 210 m로 유지된다. 발전소는 주 발전기 4기와 보조 발전기 5기로 구성되어 있고, 주 발전기와 보조 발전기의 최저 발전 운영수위는 각각 El. 180 m와 El. 160 m이다. 한편, Angat 댐의 주 발전기와 보조 발전기는 총 9기로, 7기는 K-water 소유이며 보조발전기 2기는 마닐라 상하수도청(Metropolitan Waterworks and Sewerage System; MWSS)의 소유이다(Table 2).

2.3.2 Angat 댐의 유입량과 용수공급 계획

Table 3은 1946년부터 2012년까지 측정된 Angat 댐의 월 평균 유입량이다. 해당 기간에서 1964년부터 1967년까지는 유입량이 결측되었고, 2000년 이후에는 Umiray 터널을 통한 도수량이 반영된 유입량이다. 2000년 이후의 유입량은 이전의 유입량보다 평균 7.36% 큰 것으로 나타났다. 한편, Table 4는 Angat 댐의 월별 용수공급 계획을 나타낸다. Angat 댐의 월별 생·공용수 공급 계획은 46 m^3/s로서 동일한 반면, 농업용수의 경우 8.42~43.14 m^3/s까지 연중 다르게 공급하는 것을 볼 수 있다. 그리고 별도의 하천유지용수 공급에 대한 계획은 없다.

Table 3을 통해 Angat 댐의 유입량은 주로 홍수기에 집중되는 것을 확인할 수 있으나, Anagat 댐의 홍수기 제한수위 유지기간(5~11월)과는 다소 차이를 보인다. 그리고 1월부터 7월까지의 실적 유입량은 해당 월의 용수공급 계획에 크게 미치지 못하는 것을 볼 수 있다. 따라서 Angat 댐에서는 홍수기에 유입된 물을 효과적으로 관리하여 건기에 활용할 수 있는 저수지 운영 방법이 필수적이다.

3. 연구내용

3.1 저수지 운영 모형과 유입량 모의 발생

3.1.1 저수지의 질량 보존식

저수지 운영 모형의 기본방정식에는 저수지 유입량, 저수량, 방류량을 고려하는 질량 보존식이 사용된다. 저수지의 일반적인 질량 보존식은 Eq. (1)과 같다.

$$ST_{t+1} = ST_t + PP_t + QF_t - R_t - EV_t \quad (1)$$

여기서, ST_{t+1}은 $t+1$ 시간 초(初)의 저수지 저류량, PP_t은 t 시간 동안에 저수지의 표면에 내린 강우량, QF_t는 t 시간 동안에 저수지의 유입량, R_t는 t 시간 동안에 저수지로부터 유출되는 총 방류량, EV_t는 t 시간 동안에 저수지의 표면에서 발생하는 증발량을 의미한다.

필리핀의 Angat 댐 유입량 자료는 저수지의 저류량 변화량에서 관측된 방류량을 뺀 값으로 계산하여 산정되기 때문에 저수지의 표면에 내린 강수량(PP_t)과 저수지로부터의 증발량(EV_t)의 개념은 이미 저수지 유입량(QF_t)에 포함된 것으로 볼 수 있다. 따라서 Angat 댐의 수문 상황에 맞도록 수정한 질량 보존식은 Eq. (2)와 같다.

$$ST_{t+1} = ST_t + QF_t - R_t \quad (2)$$

본 연구의 목적은 장기 저수지 운영률을 구하여 최적의 방류량을 결정하는 것으로 Eq. (2)에서 저수지의 총 방류량(R_t)을 각각의 목적에 해당하는 방류량 성분으로 세분화할 필요가 있다. 즉, 총 방류량을 Eq. (3)과 같이 생·공용수 공급량(R_{DI}), 농업용수 공급량($R_{Agr,t}$), 생·공용수와

Table 3. Historical Inflow of Angat Dam (unit: m^3/s)

Classification	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Mean
'46~'99	47.6	27.5	21.7	16.7	20.8	40.3	71.8	98.0	87.9	119.1	116.9	98.6	63.9
'00~'12	54.9	49.0	30.0	22.8	34.1	43.6	83.7	97.5	84.4	93.3	127.1	102.2	68.6
Mean	49.1	32.0	23.4	18.0	23.6	41.0	74.2	97.9	87.2	113.8	119.0	99.3	64.9

Table 4. Monthly Water Supply Planning of Angat Dam (unit: m^3/s)

Classification	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Mean
Municipal and industrial	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46.0
Irrigation	42.29	43.14	29.88	14.71	8.42	23.97	40.42	33.81	33.83	17.08	24.32	40.55	29.4
Total	88.29	89.14	75.88	60.71	54.42	69.97	86.42	79.81	79.83	63.08	70.32	86.55	75.4

농업용수를 초과하여 공급하는 양($R_{EX,t}$), 여수로 방류량($R_{SP,t}$)으로 구분하였다. 여기서 R_{DI}는 전체 시간 동안 동일한 값이며, $R_{Agr,t}$, $R_{EX,t}$, $R_{SP,t}$는 시간에 따라 변하는 값이다. 최종적으로 본 연구에서는 Eq. (2)에 Eq. (3)을 대입하여 최종적으로 저수지의 질량 보존식을 Eq. (4)와 같은 형태로 도출하였다.

$$R_t = R_{DI} + R_{Agr,t} + R_{EX,t} + R_{SP,t} \quad (3)$$

$$ST_{t+1} = ST_t + QF_t - (R_{DI} + R_{Agr,t} + R_{EX,t} + R_{SP,t}) \quad (4)$$

3.1.2 저수지 운영 모형의 개발

전 절의 저수지 질량 보존식과 수위 구간별 운영률을 이용하여 저수지 운영 모형을 개발하였다. 모형은 Compaq Visual Fortran으로 작성하였으며, 메인 프로그램과 6개의 보조 프로그램으로 구성되어 있다. 개발된 저수지 운영 모형의 입력자료는 초기 저수위, 저수지의 제원(저수위, 홍수기 제한수위, 상시만수위), 댐의 유입량과 월별 계획 용수공급량이다. 그리고 저수지 수위 구간을 결정하는 최대, 최소, 상·중·하위 수위와 각각의 수위 구간에 해당하는 댐 운영 기준이 입력된다. 이러한 입력자료에 근거하여 저수지 운영 모형은 현재 시간 초(初)의 저수량 storage (t)와 t 시간 구간에 대한 예측 유입량 inflow (t)의 합에 상응하는 수위를 구하여 해당 수위가 어느 운영 구간에 속하는 지를 결정한 후, Table 1과 같이 운영 구간에 따라 t 시간 구간 동안의 방류량 release (t)를 결정한다. 예측 유입량은 강우-유출 모형 또는 과거 실제 유입량의 시간 구간별 평균값 등을 사용할 수 있다. 전체 모의기간에 대한 댐의 저류 및 방류가 계산되면 발전량을 산정하고, 각 시간별 저수위, 저수량, 방류량, 계획 용수공급량 대비 부족량 등을 출력한다. 이와 같은 계산 과정에 대한 흐름도는 Fig. 4와 같다.

3.1.3 저수지 유입량의 모의 발생

저수지 운영률 도출에 있어서 댐 유입량은 매우 중요한 수문자료이다. Angat 댐에는 63년간의 유입량 자료가 확보되어 있지만, 신뢰적인 저수지 운영률 도출을 위해서는 보다 장기간의 댐 유입량 자료가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Angat 댐 유입량의 통계적 특성을 시간적으로 보존하는 추계학적 수문모의 발생 기법(stochastic hydrologic generation technique)을 사용하여 유입량 자료를 확보하였다.

연구에서는 댐 유입량의 모의 발생을 위해 SAMS 2007 (Sveinsson et al., 2007)을 이용하였고, 다계절 ARMA (autoregressive moving average model) 모형을 이용하여 500년간의 월 단위 유입량을 모의 발생시켜 저수지 운영률 도출에 활용하였다. Fig. 5는 실제 월별 유입량과 SAMS 2007을 통해 모의 발생시킨 월별 유입량의 통계량을 비교하여 나타낸 그림이다. 모의발생 자료와 원시 시계열 자료의 통계적 비교는 평균, 표준편차, 변동계수, 왜곡도에 대해 수행하였다. 평균의 경우는 모의발생 자료와 원시 자료의 차이는 적었다(Fig. 5(a)). 표준편차는 4월, 5월, 7월에 차이를 보였으며, 나머지 월들은 차이가 적었다 (Fig. 5(b)). 변동계수와 왜곡도는 표준편차가 포함되어

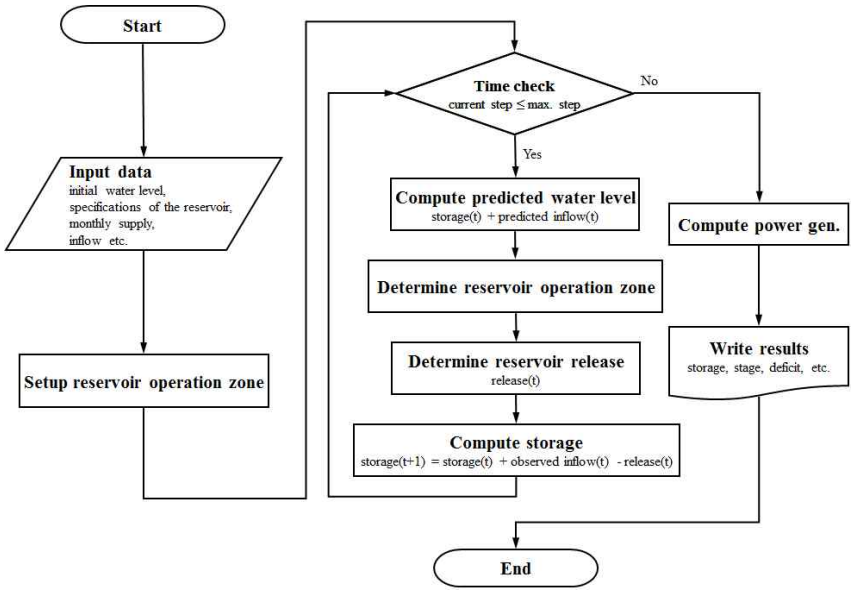
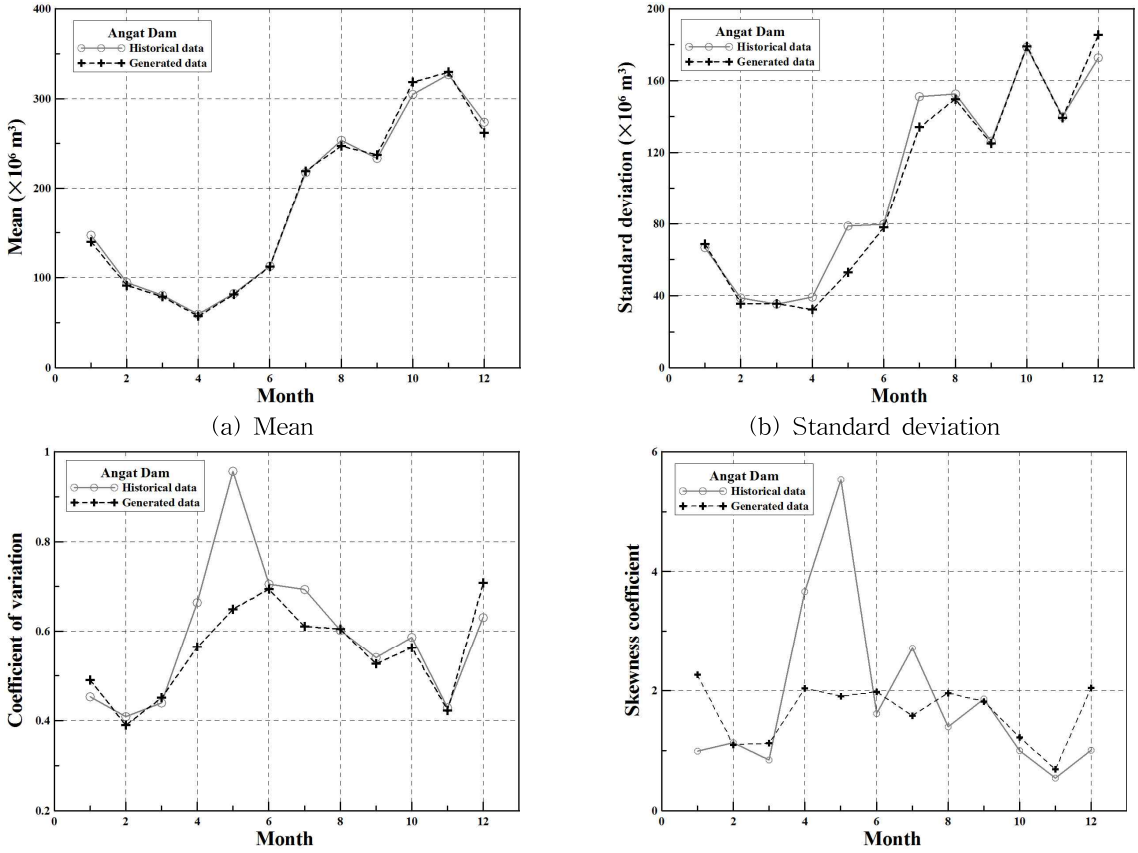


Fig. 4. Flowchart of the Developed Reservoir Operation Model



(a) Mean (b) Standard deviation

(c) Coefficient of variation (d) Skewness coefficient

Fig. 5. Comparison of Statistics Values between Historical and Generated Inflows

산정되는 통계값으로 4월, 5월, 7월에 원시 자료의 통계값과 차이를 보였다(Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)).

3.2 집합체 혼합진화 알고리즘을 이용한 최적화 모형 수립

3.2.1 결정 변수

저수지 운영률 결정에 필요한 것은 시간 구간별로 6 개의 운영 영역을 결정하기 위한 5개의 수위이다. 그 중 2 개는 홍수기 제한수위와 저(低)수위로 고정된 값이므로 상·중·하위 수위가 결정 변수에 해당된다. 그리고 각각의 수위는 월별로 결정되어야 하므로 결정해야할 수위는 Fig. 6과 같이 총 36개이다.

참고로 본 연구에서 사용한 집합체 혼합진화 알고리즘은 Tolson and Shoemaker (2007)과 Kang and Lee (2014)에 의해 20~30개의 결정변수를 추정하는데 활용한 바 있고, Kang (2011)의 연구에서는 80개의 결정변수를 추정하는 최적화 문제들에서도 좋은 결과를 도출하는 것으로 제시하였다. 따라서 본 연구에서 추정하고자 하는 36개의

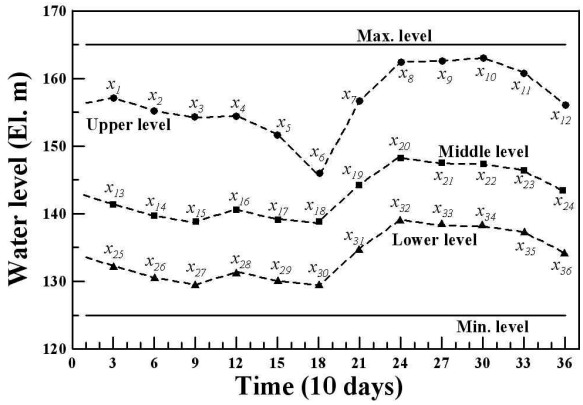


Fig. 6. 36 Variables to Be Determined for Zone-Based Operation Rule

저수지 운영 수위의 결정에 집합체 혼합진화 알고리즘을 사용하는 것은 적절한 것으로 판단된다.

3.2.2 저수지 운영률 결정을 위한 목적함수

최적화 기법에 의한 해석을 위해서, 기본적으로 목적함수(objective function)와 제약조건식(constraint)이 필요

하다. 그리고 단독운영을 위한 장기 저수지 운영률을 결정하기 위해서는 제약조건의 일부로서, 저수지의 유입·유출 관계를 결정하는 질량 보존식(mass balance equation)의 설정이 필요하다(Mays and Tung, 1992). 본 절에서는 최적화 기법에 사용된 목적함수와 제약조건식에 대하여 기술하고 있다.

이수 측면의 댐 운영에서 가장 중요한 목표는 계획된 공급량을 안정적으로 공급하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 댐 운영의 전체기간 동안 물 부족 지수(shortage index)를 최소화하는 목적함수를 저수지 수위의 결정에 사용하였다. 미 공병단에서 제안된 물 부족 지수는 물 부족의 정도를 판단하는 대표적인 지표이다(U.S. Army Corps of Engineers, 1975). 사용한 목적함수의 형태는 Eq. (5)와 같으며, 용수 공급량에 대한 부족량의 비율을 제곱하여 결정된다.

$$\text{Minimize } SI = \frac{100}{N}\sum_{t=1}^{N}\left(\frac{Deficit_t}{Supply_t}\right)^2 \qquad (5)$$

여기서, t는 계산시간 간격이고, 순단위로 계산되므로 N은 총 순의 개수이다. $Deficit_t$은 t 기간의 공급 계획량과 실제 공급량의 차이를 나타내는 부족량이며, $Supply_t$은 t 기간의 용수 공급량이다.

3.2.3 저수지 운영에 관한 제약조건식

본 연구에서는 저수지 운영의 제약조건으로 저류량과 총 방류량의 상한 및 하한을 적용하였다. 사용된 제약조건들은 Eq. (6)과 같다.

$$ST_{\min} \le ST_t \le ST_{\max}, \quad R_{\min} \le R_t \le R_{\max} \qquad (6)$$

여기서, $ST_{\min}$과 $ST_{\max}$는 저수량의 최소값과 최대값을 나타내며, $R_{\min}$과 $R_{\max}$는 총 방류량의 최소값과 최대값을 나타낸다.

Angat 댐은 홍수기인 5월 1일부터 11월 30일까지는 홍수기 제한수위인 El. 210 m를, 그 외의 기간에는 상시만수위(El. 212 m)를 초과하지 않도록 운영된다. 그리고 Angat 댐에서 최소한 유지해야 할 수위는 저(低)수위인 El. 160 m이다. 이것은 댐을 운영함에 있어서 수위가 저(低)수위 이하로 하강 시에는 일체의 방류를 수행하지 않는 사항을 고려한 것이다. 따라서 Angat 댐 운영의 제약조건으로서 연중 저(低)수위에 해당하는 저류량 이상을 유지하도록 설정하였고, 시기별로 상시만수위 또는 홍수기 제한수위에 해당하는 저류량을 넘지 않도록 설정하였다.

Angat 댐의 방류 형태는 발전 방류와 여수로 방류를 통하여 이루어진다. Angat 댐의 경우, 수력발전을 위한 별도의 발전용수를 할당하지 않고, 발전을 통해 사용된 물을 하류로 방류하여 용수공급에 사용되도록 하고 있다. 총 방류량의 최소값은 저수지 수위가 저수위 아래로 내려가는 경우를 고려하여 '0'으로 설정하였고, 총 방류량의 최대값은 최대 발전방류량 223.65 m^3/s와 여수로 최대방류량 5,600 m^3/s의 합으로 설정하였다.

3.3 수위 구간별 저수지 운영률 결정 및 검토

3.3.1 저수지 수위 구간의 결정

저수지 수위 구간의 최적 결정을 위해 저수지 운영 모형과 집합체 혼합진화 알고리즘을 결합하였다. 결합된 프로그램에 의한 저수지 수위 구간의 결정 절차는 Fig. 7과 같다. 집합체 혼합진화 알고리즘에 의해 초기에 무작위로 발생된 표본 요소(randomly generated sample point; decision variables)와 진화 과정 후에 생성된 새로운 요소(new point)에 대하여 저수지 운영 모형을 수행한다. 그리고 각각의 요소에 대하여 수행된 저수지 운영 모형의 결과는 Eq. (5)의 목적함수 값을 통해 평가되고, 수렴 기준이 만족될 때까지 반복된다.

3.1.2절의 수위 구간별 운영률이 고려된 저수지 운영 모형은 Angat 댐에 대하여 500년간 모의 발생된 유입량 자료를 이용하여 순(10일) 단위로 구성되었다. 그리고 집합체 혼합진화 알고리즘을 이용하여 계획 용수공급량에 대한 부족분을 최소화하도록 매월 말의 구간 경계수위를 결정하였다. 결정된 월별 구간 경계수위는 Fig. 8과 같다.

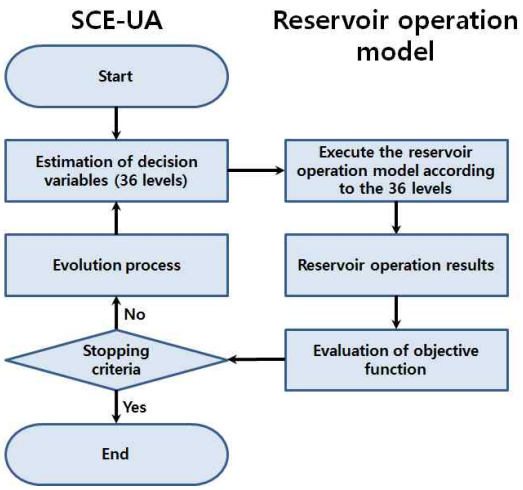


Fig. 7. Determination Process of 36 Water Levels for Zone-Based Operation Rule

Fig. 8에서 순별 운영 수위는 월별 수위를 선형 보간하여 결정된 것이다. 그림에서 3개의 파선은 본 연구에서 도출된 운영기준 수위이고, 십자(+)와 원(●) 표식의 실선은 각각 Angat 댐 운영자가 현재 사용하고 있는 상·하한 기준수위이다.

3.3.2 저수지 운영률의 검토

금회 개발된 수위 구간별 운영률을 고려한 저수지 운영 모형과 결정된 저수지 구간 경계를 이용하고, 2000~2012년(13년간) 관측 일 유입량 자료를 이용하여 모의 운영을 수행하였다. 현지 Angat 댐의 사정으로 13년간의 관측 유입량은 제공받을 수 있었으나, 저수지의 수위자료는 2006년부터 확보할 수 있었다. 모의 운영을 위해 제반자료를 순단위로 정리하여 입력자료로 사용하였고, Table 1의 방류기준을 반영한 저수지 운영 모형에 3.3.1절에서 결정된 구간별 수위를 반영하여 모의 운영을 수행하였다. 순단위 예측유입량은 과거 실적자료를 사용하였다.

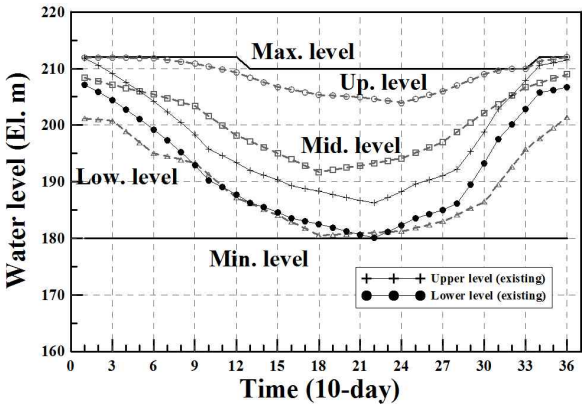


Fig. 8. Determination Results for Zone Based Operation Rule of Angat Dam

Fig. 9는 실제 저수지 운영과 모의 운영의 결과를 비교하여 나타낸 그림이다. 대체로 모의 운영에 의한 결과가 실제 운영에 의한 결과보다 높은 수위를 유지하는 것으로 분석되었다. 특히, 가뭄이 심했던 2007년과 2010년의 건기에 대한 실제 운영의 결과는 저(低)수위(El. 160 m)를 크게 밑도는 운영을 보인 반면, 모의 운영 결과의 수위는 상대적으로 실제 운영 수위보다 높게 유지되는 것으로 나타났다.

Table 5는 저수지 운영률에 의해 모의 운영된 공급량과 계획 용수공급량 대비 부족량을 실제 운영기록과 비교한 표이고, Fig. 10은 연도별 물 공급량과 물 부족량을 도식적으로 비교한 그림이다. 공급량 측면에서는 모의 운영의 결과가 실제 운영기록에 비해 연간 40.1×10^6 m^{3}를 추가 공급하는 것으로 분석되었다. 계획 용수공급량 대비 용수공급 부족량의 경우, 실제 댐 운영을 통해 연간 405.8

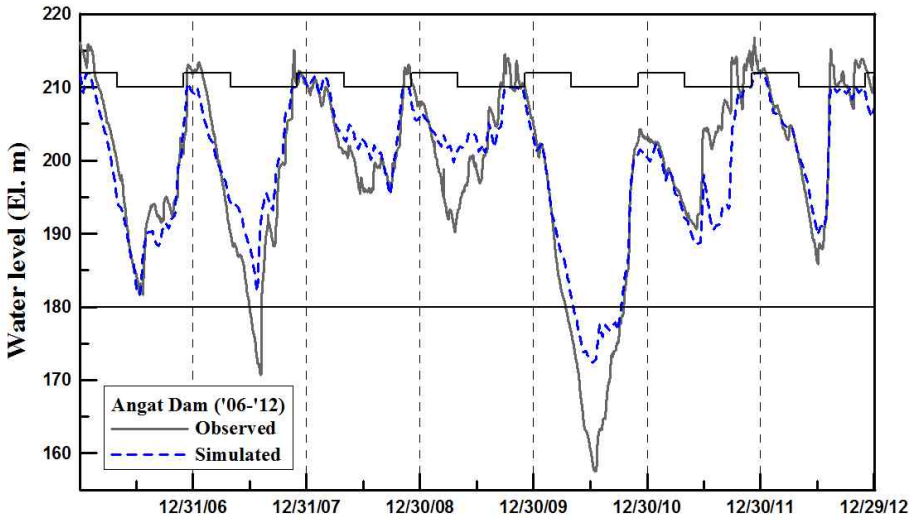


Fig. 9. The Results Simulated by the Reference Water Levels of Angat Dam

Table 5. Comparison of Water Supply and Deficit between Historical and Simulated Data

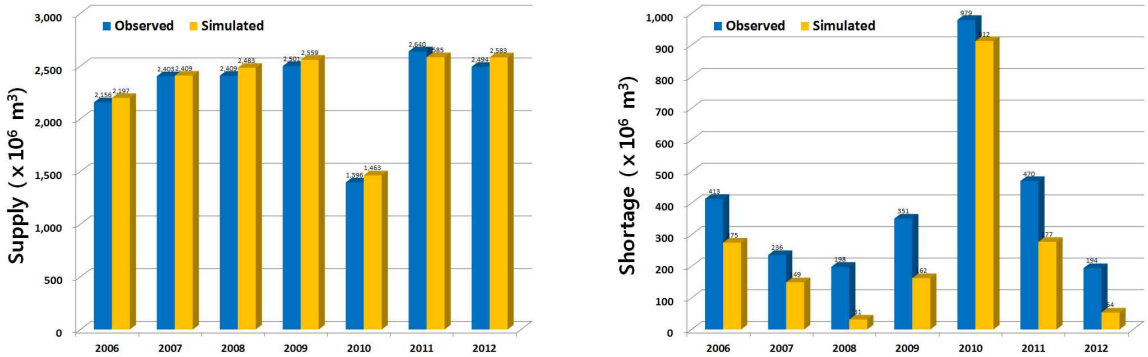
Classification	Water supply		Difference (b)-(a)	Water deficit		Difference (d)-(c)
	Historical (a)	Simulated (b)		Historical (c)	Simulated (d)	
Annual average (10^6 m^3)	2,285.5	2,325.6	40.1	405.8	265.9	-139.9

$\times 10^6\,m^3$의 용수 부족이 발생한 반면, 모의 운영을 통해 연간 $265.9 \times 10^6\,m^3$의 용수 부족이 발생해 모의 운영을 통해 약 34.5%의 물 부족이 감소하는 것으로 분석되었다. 한편, Table 5와 Fig. 10에서 실제 운영과 모의 운영에 의한 총 공급량의 차이에 비해 용수공급 부족량의 차이가 큰 것은 실제 운영의 총 공급량 가운데 용수공급에 활용되지 못한 여수로 방류가 많이 포함되어 있기 때문이다.

발전량 분석에서는 상한 수위 이상에서는 주 발전기와 보조 발전기를 모두 가동($223.65\,m^3/s$)하도록 하였고, 상한 수위 미만에서는 관개용수와 생활용수를 각각 주 발전기와 보조 발전기에 배분하여 방류하도록 하였다. 이 때, 발전기 효율은 95%, 수차 효율은 90%, 손실수두는 주 발전기에서 1.0 m, 보조 발전기에서 4.0 m를 적용하였다. 발전량의 분석 결과, 2000~2012년에 대한 연간 모의 발전량은 544 GWh로 실적 발전량 449 GWh 대비 95 GWh(약 21.2%) 증가하는 것으로 분석되었다. Fig. 11은 연도별 모의 발전량과 실적 발전량을 비교한 그림이다.

3.3.3 결과 고찰

본 연구에서 도출한 운영률에 의한 Angat 댐의 용수공급 및 발전에 관한 운영 결과가 기존 실적보다 크게 개선된 이유를 두 가지 측면에서 설명할 수 있다. 첫 번째는 본 연구의 목적인 안정적인 용수공급이 달성될 수 있는 적절한 댐 운영률이 결정된 것에 근거한다. 즉, 용수공급의 부족이 최소화 되도록 댐의 운영률이 결정됨에 따라 불필요한 방류는 줄어들었고, 연중 계획된 용수공급량이 최대한 공급될 수 있는 효과적인 댐 운영률이 제시되었기 때문이다. 두 번째는 현재의 Angat 댐 운영자들이 댐 운영에 관한 전문성이 부족한 것에 근거한다. Angat 댐 운영자들은 현재의 저수 상황, 유입량의 예측 등을 고려하지 않고 계획된 용수공급량을 방류하고 있다. 또한, 유입량이 많은 우기의 경우, 잦은 여수로 방류를 시행하고 있다. 실제로 Angat



(a) Water supply (b) Water deficit

Fig. 10. Comparison of Water Supply and Deficit between Historical and Simulated Data

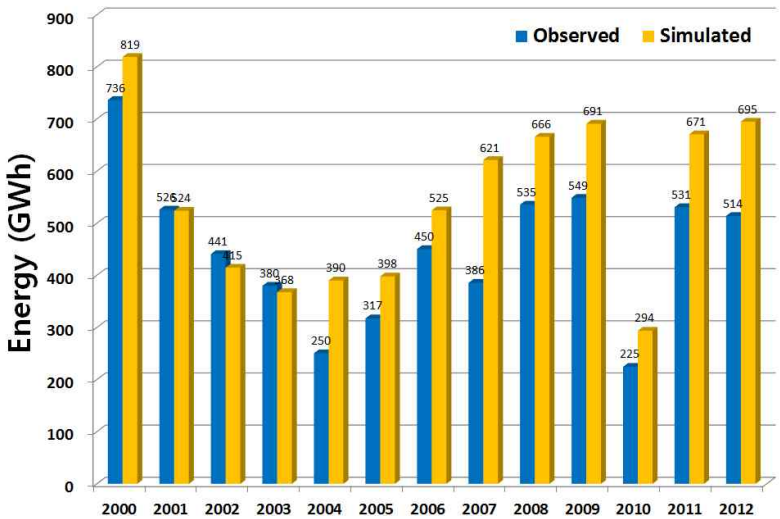


Fig. 11. Comparison of Hydropower Generation between Historical and Simulated Data

댐의 연평균 여수로 방류량은 $197 \times 10^6 m^3$인 반면, 모의 운영에서는 예측 유입량을 고려하여 저수량을 효율적으로 사용하였기 때문에 여수로 방류량이 $3 \times 10^6 m^3$에 불과하다. 다만, 실제의 여수로 방류는 주로 시간 단위 이하의 짧은 간격에서 수행되므로 순단위의 분석을 수행한 본 연구에서는 이를 반영하지 못한 한계가 존재한다.

상기의 분석 내용은 과거에 기 측정된 유입량 자료를 예측 유입량으로 이용한 것으로서, 미래의 정확한 유입량을 알고 있다는 전제 하에서 모의된 결과이다. 하지만 미래의 저수지 유입량은 불확실하고, 더욱이 장기간의 유입량은 예측이 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서 제안한 수위 구간별 운영률이 실무적으로 잘 활용되기 위해서는 댐 유입량 예측 정보를 이용한 분석을 통해 효용과 효과가 입증될 필요가 있다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 댐 운영자가 이수 목적의 장기 저수지 운영에 관하여 쉽게 이해할 수 있고, 적용하기에 용이한 수위 구간별 저수지 운영률을 제시하였고, 해당 운영률을 이용한 저수지 모의 운영을 위해 저수지 운영 모형을 개발하였다. 그리고 장기 저수지 운영의 기준이 되는 수위 구간의 설정에는 전역최적화 알고리즘인 집합체 혼합진화 알고리즘이 사용되었다.

연구에서는 제안된 수위 구간별 저수지 운영률을 상대적으로 용수 수요에 비해 유입량이 작고, 여름철에 집중된 강우에 의해 댐 운영에 어려움을 겪고 있는 필리핀의 Angat 댐에 대하여 적용하여 평가하였다. 도출된 Angat 댐의 수위 구간별 운영률을 이용하여 2000~2012년에 대하여 적용하였고, 이를 동일 기간의 실제 운영 기록과 비교하였다. 그 결과, 공급량의 경우 모의 운영의 결과가 실제 운영기록에 비해 연간 $40.1 \times 10^6 m^3$를 추가 공급하는 것으로 분석되었다. 계획 용수공급량 대비 용수공급 부족량은 모의 운영의 결과가 실제 운영 기록에 비해 약 34.5 %의 물 부족을 감소시키는 것으로 분석되었다. 발전량의 경우에도 모의 운영에 의한 연 평균 발전량은 544 GWh로 연 평균 실적 발전량 449 GWh 대비 95 GWh(약 21.2%) 증가시키는 것으로 분석되었다. 즉, Angat 댐에 대한 최적의 수위 구간별 운영률을 도출하여 용수 부족의 감소와 발전량 증가를 기대할 수 있는 것으로 검토되었다.

본 연구에서는 과거의 기 측정된 자료에 의한 모의 운영을 통해 상대적으로 실적 자료에 비해 수위 구간별 운영률에 의한 모의 운영이 우수함을 보였다. 이는 기왕의 유입량을 알고 있다는 조건에서 계산되어진 결과이다. 하지만 미래에 대한 장기간의 저수지 유입량은 불확실하고, 예측이 어렵다. 따라서 보다 현실적으로 수위 구간별 운영률의 적절성을 평가하기 위해서는 향후 댐 유입량 예측 정보를 이용한 분석이 추가적으로 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의해 수행되었습니다. 연구비를 지원해 주신 부경대학교에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

References

Bekey, G.A., and Ung, M.T. (1974). "A comparative evaluation of two global search algorithms." *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 4, pp. 112-116.

Chen, L. (2003). "Real coded genetic algorithm optimization of long term reservoir operation." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 39, No. 5, pp. 1157-1165.

Cheong, T.S., Kang, S., Hwang, M., and Ko, I. (2008). "Development and validation of reservoir operation rules for integrated water resources management in the Geum river basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 41, No. 4, pp. 433-444.

Duan, Q. (1991). *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic models*. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA.

Duan, Q., Gupta, V., and Sorooshian, S. (1994). "Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models." *Journal of Hydrology*, Vol. 158, pp. 265-284.

Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. (1992). "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models." *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 1015-1031.

Eum, H.I., and Park M.K. (2010). "Reservoir operating system using sampling stochastic dynamic programming for the han river basin." *Journal of Korea Water*

Resources Association, Korea Water Resources Association, Vol. 43, No. 1, pp. 67-79.

Hiew, K. (1987). *Optimization algorithms for large scale multi-reservoir hydropower systems.* Ph.D. dissertation, Colorado State University, Colorado, USA.

Hiew, K., Labadie, J., and Scott, J. (1989). *Optimal operational analysis of the Colorado-Big Thompson project.* Computerized decision support systems for water managers, Edited Labadie J. et al., ASCE, Reston, VA., pp. 632-646.

Kang, S.U. (2011). *Development and application of water level zone decision method for long-term reservoir operation using dynamically dimensioned search algorithm.* Ph.D. dissertation, Pukyong National University, Busan, Korea.

Kang, T., and Lee, S. (2014). "Development on an automatic calibration module of the SWMM for watershed runoff simulation and water quality simulation." *Journal of Korea Water Resources Association,* Korea Water Resources Association, Vol. 47, No. 4, pp. 343-356.

Kim, S. (1988). "Methodological overview of reservoir operation method." *Magazine of Korea Water Resources Association,* Korea Water Resources Association, Vol. 21, No. 1, pp. 16-24.

Ko, S.K., Lee, G.M., and Ko, I.H. (1992). "Comparative evaluation of multipurpose reservoir operating rules using multicriterion decision analysis techniques." *Magazine of Korea Water Resources Association,* Korea Water Resources Association, Vol. 25, No. 1, pp. 75-82.

Ko, S.K., Lee, G.M., and Lee, H.G. (1997). "Development of reservoir operating rule using explicit stochastic dynamic programming." *Journal of Korea Water Resources Association,* Korea Water Resources Association, Vol. 30, No. 3, pp. 269-278.

Ko, I.H., and Chung, S.W. (2002). "Construction scheme of integrated water resources management based technology (II)." *Magazine of Korea Water Resources Association,* Korea Water Resources Association, Vol. 35, No. 6, pp. 71-78.

Kwon, O.H., and Seong, S.J. (1980). "Development of the optimum operation model for the North Han River system." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers,* Korean Society of Civil Engineers, Vol. 28, No. 4, pp. 95-104.

Labadie. J.W. (2004). "Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review." *Journal of Water Resources Planning and Management,* ASCE, Vol. 130, No. 2, pp. 93-111.

Mays, L.W., and Tung, Y.K. (1992). *Hydrosystems Engineering and Management.* Mcgraw-Hill.

Needham, J., Watkins, D., Lund, J., and Nanda, K. (2000). "Linear programming for flood control in the Iowa and Des Moines rivers." *Journal of Water Resources Planning and Management,* ASCE, Vol. 126, No. 3, pp. 118-127.

Oh, Y., and Lee, K. (1986). "Flood control operation of Soyang and Choongju reservoirs by the min-max DP." *Magazine of Korea Water Resources Association,* Korea Water Resources Association, Vol. 19, No. 4, pp. 339-344.

Raman, H., and Chandramouli, V. (1996). "Deriving a general operating policy for reservoirs using neural network." *Journal of Water Resources Planning and Management,* ASCE, Vol. 122. No. 5, pp. 342-347.

Sveinsson, O.G.B., Salas, J.D., Lane, W.L., and Frevert, D.K. (2007). *Stochastic Analysis, Modeling, and Simulation (SAMS) Version 2000-User's Manual.* Technical Report Number No. 11, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

Tejada-Guibert, J.A., Stedinger, J.R., and Staschus, K. (1990). "Optimization of value of CVP's hydropower production." *Journal of Water Resources Planning and Management,* ASCE, Vol. 116, No. 1, pp. 52-70.

Tolson, B.A., and Shoemaker, C.A. (2007). "Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration." *Water Resources Research,* AGU, Vol. 43, W01413.

Trezos, T. (1991). "Integer programming application for planning of hydropower production." *Journal of Water Resources Planning and Management,* ASCE, Vol. 117, No. 3, pp. 340-351.

U.S. Army Corps of Engineers (1975). *Reservoir Yield. Hydrologic Engineering Methods for Water Resources Development,* Vol. 8, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

U.S. Army Corps of Engineers (1977). Reservoir System Analysis for Conservation. Hydrologic Engineering Methods for Water Resources Development, Volume 7, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

U.S. Army Corps of Engineers (1996). Developing Seasonal and Long-term Reservoir System Operation Plans using HEC-PRM. Research Document, No. 40, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

Wurbs, R. (1993). "Reservoir-system simulation and optimization models." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 119, No. 4, pp. 455-472.

Yeh, W. (1985). "Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 21, No. 12. pp. 1797-1818.

Yoo, J.H. (2000). "Development of Han river multi-reservoir operation rules by linear tracking." *Journal of Korea Water Resources Association,* Korea Water Resources Association, Vol. 33, No. 6, pp. 733-744.

논문번호: 14-068	접수: 2014.07.29
수정일자: 2014.09.04/09.23	심사완료: 2014.09.23