

# 유입량의 변동성을 고려한 저수지 연계 운영 모형의 가중치 선정

## Determination of Weight Coefficients of Multiple Objective Reservoir Operation Problem Considering Inflow Variation

김민규\* / 김재희\*\* / 김승권\*\*\*

Kim, Min Gyu / Kim, Jae Hee / Kim, Sheung Kown

### Abstract

The purpose of this study is to propose a procedure that will be able to find the most efficient sets of weight coefficients for the Geum-River basin in Korea. The result obtained from multi-objective optimization model is inherently sensitive to the weight coefficient on each objective. In multi-objective reservoir operation problems, the coefficient setting may be more complicated because of the natural variation of inflow. Therefore, for multi-objective reservoir operation problems, it may be important for modelers to provide reservoir operators with appropriate sets of weight coefficients considering the inflow variation. This study presents a procedure to find an appropriate set of weight coefficients under the situation that has inflow variation. The proposed procedure uses GA-CoMOM to provide a set of weight coefficient sets. A DEA-window analysis and a cross efficiency analysis are then performed in order to evaluate and rank the sets of weight coefficients for various inflow scenarios. This proposed procedure might be able to find the most efficient sets of weight coefficients for the Geum-River basin in Korea.

**keywords** : weight coefficient, DEA-window analysis, cross-efficiency, multiple objective optimization, reservoir operation

### 요 지

본 연구의 목적은 금강수계의 가장 효율적인 가중치를 찾을 수 있는 절차를 제시하는 것이다. 일반적으로 다목적 최적화 모형의 결과는 목적함수에 부여된 가중치에 크게 좌우되는 경향이 있다. 특히 다목적 저수지 운영 문제의 경우는 어떤 유입량 시나리오가 적용되느냐에 따라 그에 적합한 가중치가 크게 달라질 수 있다. 따라서 유입량의 변동성을 감안해서 저수지 운영자에게 적합한 초기 가중치를 적용하는 것은 매우 큰 의미가 있다. 이에 본 연구는 유입량의 불확실성을 감안하여 적절한 가중치군을 도출할 수 있는 절차를 제안한다. 제안한 절차에서는 다중목적 최적화 모형(GA-CoMOM)을 통해 파레토 집합에 대응되는 가중치군을 도출하고, DEA-윈도우분석(DeA-window analysis)

\* 고려대학교 정보경영공학전문대학원 석사과정  
Master Student, Graduate School of Information Management and Security, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea  
(e-mail : fkeod@korea.ac.kr)  
\*\* 군산대학교 경영회계학부 조교수  
Assistant Professor, School of Business Administration & Accounting, Kunsan Nat'l Univ., Gunsan 573-701, Korea  
(e-mail : jheekim@kunsan.ac.kr)  
\*\*\* 교신저자 · 고려대학교 정보경영공학부 정교수  
Professor, Division of Information Management Engineering, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea  
(e-mail : kimsk@korea.ac.kr)

과 교차효율성 분석(cross-efficiency analysis)을 사용하여 후보 가중치에 대한 순위를 산정하고, 이 결과를 분석해서 적합한 가중치를 선정한다. 이 절차를 금강 수계 저수지군 연계 운영 문제에 적용한 결과 유입량의 불확실성을 감안해서 가중치를 설정할 수 있었다.

**핵심용어** : 가중치, DEA-원도우분석, 교차효율성, 다중목적 최적화, 저수지 운영

## 1. 서 론

과거의 최적화 저수지 연계운영 모형은 경제성에 기반을 둔 단일 목적 함수를 가정함으로써 현실과는 동떨어진 결과를 도출하곤 하였다. 그러나 현실은 다수의 목적을 고려해야하며, 불확실한 미래 유입량의 변화에도 대응이 가능한 결정을 필요로 한다. 하지만 현재 기술로 미래 유입량을 정확하게 예측하기 어려울 뿐만 아니라, 각 목적간의 우선순위를 가늠하기 위한 적당한 가중치(weighting factor)를 찾는 것도 쉽지 않다. 왜냐하면 어떤 목적들은 서로 영향을 주고받고 때로는 상충관계를 형성하기도 하기 때문이다. 그러므로 좀 더 현실적인 최적화 모형이 되기 위해서는 실제 운영과정을 모사할 수 있도록 적절한 초기 가중치를 부여하여 모형을 구축하고, 그 중 상충되는 목적간의 절충안으로 파레토 최적해 전방선(pareto optimal frontier)을 구해서 제시하는 다중목적 의사결정 기법이 요구 된다(김승권, 박영준; 1998, Kim et al., 2005; 김재희 등, 2007).

다양한 파레토 최적해<sup>1)</sup>를 제시하기 위해서는 구한 최적해가 파레토 최적해 전방선에 수렴되어야 할 뿐만 아니라 동시에 구한 최적해 들이 전방선 상에 골고루 분산되어 나타나야 하는 어려움이 있다. Deb(2001)은 MOEA(Multi-Objective Evolutionary Algorithm)을 제안하고, 전방선(optimal frontier)에 파레토 최적해가 잘 분산 되도록 해법을 개선시켜서 NSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II)를 개발 하였다. 이 방식은 특정 응용목적에 국한되지 않고 비선형 함수에도 적용될 수 있는 범용성의 장점이 있으므로 파레토 최적해를 구할 수 있는 좋은 해법이 될 수 있다(Deb et al., 2002). 그러나 NSGA-II는 최적화 과정에서 통계적 진화과정을 따름으로써 선형계획 모형과 같이 연립방정식으로 구성되는 수학적 모형에서는 고전적인 수리계획법에 비해 비효율적인 측면이 있다. Kim and Kim(2006)은 최근에 제시한 CBITP(Convex hull of individual maxima Based Interactive Tchebycheff

Procedure)라는 방식으로 수학적 모형에서 항상 파레토 최적해 전방선에 수렴되는 해를 짧은 계산시간 내에 구함과 동시에 전방선 상에 골고루 분산되어 나타나게 하는 방법을 제안하였으며, 그 기법을 저수지군 연계운영에 적용한 결과 NSGA-II에 비해 계산 효율성이 우수하면서 최적해 전방선에의 수렴성을 향상시킬 수 있음을 보였다(김재희 등, 2007). 그러나 CBITP를 통해 균일한 파레토 최적해 집단을 도출할 수 있음에도 불구하고, 다목적 최적화 모형의 가중치를 설정하기 위해서는 다른 차원의 접근이 필요하다. 물론 CBITP에도 가중치와 비슷한 역할을 하는 매개변수가 포함되어 있지만, 이 매개변수는 제약식에 포함되어 이상점과의 가중합계 체비셰프(weighted tchebycheff)거리를 최소화하는 데 사용됨으로써, 개별목적함수의 가중합계를 위한 포괄적 형태의 가중치로의 변환이 용이하지 않다. 이런 배경에서 최근 Lee et al.(2007)은 NSGA-II를 활용하여 다중목적 저수지 최적화 모형(GA-CoMOM)<sup>2)</sup>을 구성하였다. 그리고 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 통해 가중치를 변화시켜 가면서 다목적 저수지 군 연계 운영문제의 파레토 최적해(pareto optimal solution)집단을 도출해 주는 우수한 가중치군을 선정하였다. 이 방법은 NSGA-II가 갖는 문제점에도 불구하고, 저수지 운영 문제에 후보 가중치군을 도출하는 데 응용될 수 있는 현실적인 방법이 될 수 있다. 그 이유는 NSGA-II가 CBITP와 달리 포괄적 가중치를 유전자 알고리즘의 변수로 하여 파레토 최적해를 구하므로 의사결정 변수의 제어가 쉽고, 또한 파레토 최적해 전방선에 근접하는 해를 구하는 것만으로도 가중치 선정이라는 당면 목표를 충분히 달성할 수 있기 때문이다. 그리고 그 같이 구한 초기 가중치는 CoMOM(Coordinated Multi-reservoir Operating Model)에 그대로 적용될 수 있으며, CoMOM을 내부적으로 활용해서 다목적 분석을 수행하는 CBITP의 성과에도 긍정적으로 기여하는 이점이 있다.

한편, 다목적 최적화 문제의 해의 특성상 파레토 최적

1) 파레토 최적해란 다목적 해 공간 내에 있는 어떤 다른 해에 비해서도 열등하지 않은(Non-dominated) 해들의 집합이다(Steuer, 1986).

2) 본 논문에서는 유전자 알고리즘을 통한 다중 목적 저수지 최적화 모형(CoMOM)을 GA-CoMOM이라 명명한다.

해는 열등하지 않은 해 집합(non-inferior solution set) 이므로 여러 개가 된다. 그 중에 어떤 것을 사용해도 효율적이므로 모두가 최적해라 할 수 있다. 따라서 구해진 파레토 최적해들 중에서 의사결정자의 경험과 통찰력을 활용하여 가장 선호하는 경제적인 해를 선택하게 한다. 그렇게 함으로써 모형에서 직접적으로 감안하기 어려운 경험적 기준이나 직관을 반영시킬 수 있으므로 가중치 설정에 따른 어려움에 어느 정도 능동적으로 대처할 수 있게 된다. 하지만 다수의 파레토 최적해들 중에서 선호하는 하나의 파레토 최적해를 선택하게 하는 것은 현실적으로 쉽지 않은 일이다(Hwang and Lin, 1987). 따라서 의사결정자의 어려움을 덜어줄 수 있는 방법이 필요로 하게 되었으며, 전승목 등(2007)은 다 요소 분석기법 중 하나인 자료포락분석(Data Envelopment Analysis, DEA)를 사용하여 파레토 최적해들 간의 순위를 정하게 함으로써, 결과적으로 저수지 운영 계획 시 얻어지는 파레토 최적해들 간의 우열을 판정할 수 있게 하였다. 그러나 그의 연구는 유입량이 확정적으로 정해진다는 가정 하에 이루어 졌다. 본 연구는 파레토 최적해들에 대한 선호순위가 유입량의 변화에 따라 얼마나 민감하게 변화하는 지 살펴보고 유입량 변화에 덜 민감하면서 파레토 최적해 전방선에 근접하는 해를 구할 가중치 균을 선정하는 것을 목표로 한다. 그 민감도는 다중 목적 간에 부여하는 초기 가중치를 어떻게 설정하는가에 따라서 변할 것이라 생각되며, 이에 유입량의 불확실성을 고려하면서 상황에 적합한 가중치를 구하고자 한다. 이를 위하여 GA-CoMOM을 통해 파레토 최적해 집합과 여

기에 대응되는 가중치균을 도출하고, DEA-윈도우분석(DeA-window analysis)과 교차효율성 분석(cross-efficiency analysis)을 이용해서 가중치균의 효율성을 평가한 후 이 결과를 분석함으로써 유입량의 불확실성을 고려한 적절한 가중치균을 도출하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 기본적인 DEA 모형에 대한 이해와 제시한 모형의 이론적 배경에 대하여 설명하고, 3장에서는 제시한 연구모형의 절차에 대해 설명한다. 그리고 4장에서는 금강 수계에 모형을 적용한 절차를 소개하고 결과 분석하며, 마지막으로 5장에서는 분석된 결과를 정리하고 결론과 추후 연구에 대해 논의한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 GA-CoMOM

저수지 운영계획 문제의 최적화를 위해 다양한 수학적 모형이 소개되었다(Simonovic and Marino; 1982, Yeh, 1985; Labadie, 2004). 그 중 김승권과 박영준(1998)은 한국의 상황을 고려한 CoMOM<sup>3)</sup>이라는 혼합 정수계획법(Mixed Integer Programming, MIP) 기반의 최적화 모형을 개발하였으며, 지속적인 개선을 통해 보다 현실성 있는 다목적 최적화 모형의 형태로 보완되었다(Kim et al., 2005). 이 모형의 목적함수는 여러 목적을 동시에 고려한 다중 목적 형태로 구성되며 Table 1 과 같은 선취적 우선순위가 반영되도록 기본 가중치의 크기에 차이를 두었다.

Table 1. Multiple Objectives of the Coordinated Multi-reservoir Operating Model (CoMOM)

Type of objective	Obj.	Priority	Objective Description	Multiplying factor*	
Physical Goal	Goal	Z <sub>1</sub>	1	Storage level is greater than minimum operating guide level and less than flood control level.	10 <sup>15</sup>
Operational Goal	Goal	Z <sub>2</sub>	2	Minimize the shortage of water demand	10 <sup>13</sup>
		Z <sub>3</sub>	3	Minimize the spill at the basin outlet	10 <sup>12</sup>
		Z <sub>4</sub>	4	Satisfy the minimum requirement flow	10 <sup>11</sup>
		Z <sub>5</sub>	5	Maximize the storage	10 <sup>2</sup>
	Trade-off	Z <sub>6</sub>	6	Minimize the deviation from the monthly target storage	10 <sup>1</sup>
		Z <sub>7</sub>	6	Maximize the hydroelectric energy generation	10 <sup>1</sup>

\* : multiplying factors to basic weight coefficients

- 3) 이 모형은 수계 내에 존재하는 저수지, 하천을 위시한 주요한 물리적 또는 수문학적 요소들을 공시(共時)적임과 동시에 통시(通時)적인 시-공간(時 空間) 네트워크로 구성하여 하나의 수학적 모형으로 구성하였다. 따라서 개별 댐과 하천에 부과된 저수지 운영을 위한 공간적-시간적 기준을 제약식으로 하여, 용수 공급과 발전, 목표저수위 유지, 하천유지 수량 방류 등, 안정적인 용수 공급과 하천 환경 유지를 위한 다수의 목적과, 수계 내 각 댐들의 저수형편과 총체적 미래 수문 상황을 고려하여 각 댐에서 시기별로 방류할 최적 방류량을 결정할 수 있게 해 준다. CoMOM을 실시간 운영에 활용할 경우에는 미래의 방류량은 참고용일 뿐, 바로 다음 시기의 방류량을 취하여 활용하고, 추후 변화된 수문 상황을 반영하여 반복적으로 활용하도록 하고 있다.

그리고 여기에 각 객체(댐, 수요지, 발전소 등) 및 기간별 상대적인 중요도가 곱해져서 최종적인 가중치 값이 정해진다.

각 목적은 현재 또는 미래의 편익을 위한  $Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$ , 그리고  $Z_7$ 과 같은 운영상 목적(operational goal)과 수계 운영 제약 및 특성을 효율적으로 반영하기 위해 기본적으로 지켜져야 할  $Z_1$ 과 같은 물리적 목적(physical goal)으로 나뉜다. 물리적 목적( $Z_1$ )과 운영상 목적 중  $Z_2, Z_3$ , 그리고  $Z_4$ 는 목표계획법(Goal Programming, GP)을 사용하여 우선순위에 따라 가중치를 주어 순차적으로 목표를 달성하도록 하며, 운영상 목적 중  $Z_5, Z_6$ , 그리고  $Z_7$ 은 목적간의 절충 분석(trade-off)을 통해 의사결정자의 선호에 따라 절충점을 택할 수 있도록 한다(김승권, 2006).

하지만 수시로 변화하는 수문상황 속에 매 번 절충 분석을 수행해서 가중치를 결정하는 것은 의사결정자에게 부담을 줄 수 있는 일이다. 이러한 상황 속에 Lee et al.(2007)은 의사결정자에게 선택의 폭을 넓혀주는 다양한 최적해 집단과 여기에 대응되는 가중치 집단을 도출하는 GA-CoMOM을 제안하였다. 그들의 연구는 CoMOM에서 해를 결정짓는 가장 중요한 매개변수인 저수와 발전방류에 대한 상대적 가중치를 다양하게 적용시켜 가면서 두 목적 간 상충관계를 고려한 최적해들을 도출하고자 하는 것이었다. 즉, 두 목적에 대한 가중치를 유전자 알고리즘의 결정변수로 선택하고 이상점(ideal point)에 가까운 해를 도출해주는 가중치에 적합도(fitness)를 크게 부여하는 방법으로 파레토 경계에 가까운 우수한 해 집단을 얻고자 하였다. 본 연구에서는 댐이 두 개이므로 실제로 Table 1의 다른 가중치는 모두 고정시키고 각 댐에 관련된 저수 가중치, 즉  $Z_5$ 에 해당하는 가중치만 변경해 가며 수행되고, 제시된 다양한 최적해 집단에서 의사결정자가 하나의 해를 선택하면 해당 결과에 대응되는 가중치를 선택하도록 해준다(전승목 등, 2007; Lee et al., 2007).

## 2.2 DEA-BCC 모형과 교차효율성(cross-efficiency)

GA-CoMOM에서 도출된 결과는 다수의 파레토 최적해와 여기에 대응되는 가중치군이다. 따라서 이 중 하나의 가중치, 즉 가장 우수한 가중치를 선정하기 위해서는 대안의 우선순위를 판별하는 기법이 필요하다. DEA는 다수의 투입요소와 다수의 산출요소를 가지는 평가대상, 즉 의사결정단위(Decision Making Unit, DMU)에 대한 효율성을 판정하는 기법으로 매우 유용

하다. 이는 Charnes et al.(1978)에 의해 최초로 고안된 모형으로 DMU들 간의 상대적 평가를 통해 각 DMU의 효율성을 측정한다. 여기서 DMU의 효율성은 가중 집계된 산출요소를 가중 집계된 투입요소로 나눈 값으로 정의하며, 요소마다 곱해진 계수<sup>4)</sup>를 결정변수로 하여 평가 DMU의 효율성을 최대화 하는 계수를 찾기 위해 선형계획법을 사용한다. DEA는 요소간의 함수적인 관계를 필요로 하지 않을뿐더러 비용과 이익으로 표현할 수 없는 요소에 대한 평가에도 적용 가능하여 본 연구와 같이 저수지 운영 계획 내 가중치 군의 효율성분석 등에도 유용하게 사용될 수 있다(전승목 등, 2007). 기본 DEA은 측정대상의 산출량 증가가 투입량 증가에 비례하게 변하는 CRS(Constant Returns to Scale)를 고려한 CCR모형(Charnes et al., 1978)과 투입량의 크기(scale)에 따라 구간별로 다른 비례관계를 가지는 VRS(Variable Returns to Scale)를 고려한 BCC모형(Banker et al., 1984)등으로 나누어진다. 본 연구는 저수량과 발전량 관계가 규모에 따라 비례하지 않기 때문에 다음과 같은 BCC 모형을 적용하여 효율성을 평가한다.  $N$ 개의  $DMU_n(n=1, \dots, N)$ 가 있고, 각 DMU가  $m$ 개의 투입요소로  $s$ 개의 산출요소를 낸다고 하면,  $DMU_n$ 의 투입벡터와 산출벡터는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$x_n = (x_{1n}, \dots, x_{mn}), y_n = (y_{1n}, \dots, y_{sn})$$

정의된 식을 바탕으로  $n=k$ 인  $DMU_k$ 의 효율성을 측정하기 위한 DEA-BCC모형(input-oriented)은 모형(1)과 같다.

$$\begin{aligned} \max \quad & E_k = \sum_{r=1}^s u_{rk}y_{rk} - w_k \quad (1) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^m v_{ik}x_{ik} = 1, \\ & \sum_{r=1}^s u_{rk}y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_{ik}x_{ij} - w_k \leq 0, \quad j=1, \dots, n \\ & v_{ik}, u_{rk} \geq 0, \quad \forall i, r \\ & w_k : \text{unrestricted.} \end{aligned}$$

여기서  $E_k$ 는  $k$ 번째 DMU의 효율성을 나타내는 값이며,  $u_{rk}$ 은  $k$ 번째 DMU의 산출요소의 계수를 나타내는  $s$ 차원의 변수벡터를,  $v_{ik}$ 는  $k$ 번째 DMU의 투입요소의 계수를 나타내는  $m$ 차원의 변수벡터를 나타낸다. 또한  $w_k$ 는  $k$ 번째 DMU의 VRS를 나타내는 지표를 의미한다.

그러나 기본 DEA모형은 단지 효율적인 DMU와 비효율적인 DMU를 양분하는 결과를 주기 때문에, 다수의 DMU를 ‘효율적’으로 판별하고 이들 간의 우열을 가

4) 저수지 연계운영을 위한 최적화모형의 가중치와 DEA가중치를 구분하기 위하여 DEA가중치를 ‘계수’로 표현한다.

Table 2. DEA Cross-efficiency Matrix (DMU : 6)

(Doyle and Green, 1994)

Rating DMU	Rated DMU						Averaged appraisal of peers
	1	2	3	4	5	6	
1	$E_{11}$	$E_{12}$	$E_{13}$	$E_{14}$	$E_{15}$	$E_{16}$	$A_1$
2	$E_{21}$	$E_{22}$	$E_{23}$	$E_{24}$	$E_{25}$	$E_{26}$	$A_2$
3	$E_{31}$	$E_{32}$	$E_{33}$	$E_{34}$	$E_{35}$	$E_{36}$	$A_3$
4	$E_{41}$	$E_{42}$	$E_{43}$	$E_{44}$	$E_{45}$	$E_{46}$	$A_4$
5	$E_{51}$	$E_{52}$	$E_{53}$	$E_{54}$	$E_{55}$	$E_{56}$	$A_5$
6	$E_{61}$	$E_{62}$	$E_{63}$	$E_{64}$	$E_{65}$	$E_{66}$	$A_6$
	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$	

※  $E_{25}$  is the efficiency of DMU5 by applying the optimal weights of DMU2

릴 수 있는 정보를 제공하지는 못한다. 따라서 효율적인 DMU간의 순위를 산정하기 위해 많은 방법들이 강구되었다(Adler et al., 2002). 이러한 방법 중 하나로 Doyle and Green(1994)은 교차효율성을 이용하여 DMU의 순위를 구하는 방법을 제시하였다. 교차효율성이란 특정 DMU가 기본 DEA모형을 통해 최적 계수를 얻었을 시, 이 계수를 다른 DMU들의 계수에도 교차 적용하여 효율성을 평가하는 방법이다. 이러한 절차를 모든 DMU의 최적 계수를 가지고 평가하면 Table 2와 같은 평가결과를 얻게 된다. 이는 개별 DMU가 각각에 유리한 투입, 산출요소에 큰 계수를 부여하여 다수의 '효율적' DMU가 양산되는 문제를 해결하고자 하는 방법으로 DMU의 평균적 효율을 제공한다. 교차효율성 분석의 장점은 첫째, DMU의 순위선정이 가능하게 하고, 둘째, 투입, 산출요소에 대한 비현실적 계수를 제거하고 상대적 가중치를 반영하여 비교적 객관적인 효율성을 제시하여 준다는 점이다.

모형 (1)에서  $u_r, v_i, w_k$ 는 DMUk의 효율성을 구하기 위한 결정변수(DEA의 각 요소의 계수)로, DMUk에 가장 유리하도록 결정된다. 이때 발생하는 문제점을 해결하고자 교차효율성을 사용하여 객관적인 효율성을 측정한다.  $E_{ks}$ 를 k번째 DMU의 최적계수를 가지고 s번째 DMU를 평가한 효율성이라 정의하면, 수식은 Eq. (2)와 같다.

$$E_{ks} = \frac{\sum_{r=1}^s y_{rs} \cdot u_{rk} + w_k}{\sum_{i=1}^m x_{is} \cdot v_{ik}} \quad (2)$$

여기서  $u_{rk}$ 는 k번째 DMU의 r번째 산출요소의 최적계수를 의미하며,  $v_{ik}$ 는 k번째 DMU의 i번째 투입요소의

최적계수를 의미하고,  $w_k$ 는 k번째 DMU의 VRS를 의미하는 계수를 의미한다. 이렇게 구해진  $E_{ks}$ 를 정리하면 Table 2와 같이 나타낼 수 있고, Table 2의 마지막 줄에 해당하는 부분은 Eq. (3)과 같은 수식을 이용하여 k번째 DMU의 평균 효율성 값을 산출할 수 있다.

$$e_k = \frac{\sum_{s \neq k} E_{sk}}{n-1} \quad (3)$$

### 2.3 DEA-Window analysis

기존 DEA모형은 특정기간의 투입요소와 산출요소를 모형에 사용하여 효율성분석을 시행하고 있다. 하지만 수문상황의 변화에 대비한 결과를 도출하기 위해서는 각 DMU의 년도 별 유입량 변화에 따라 변화하는 자료를 이용하여 분석을 시행하는 것이 필요하다. Charnes et al.(1985)은 효율성의 시대별 변화추이를 분석하기 위해서 DEA-윈도우분석을 기법을 제시하였다. DEA-윈도우분석은 유사환경을 갖는 자료들을 '윈도우'개념을 통해 그룹화하고, 윈도우별로 효율성을 비교함으로써 시대 변화에 따른 효율성의 변동을 파악하고자 한 방법이다. T기간 동안 관측된 N개의 DMU를 평가하고자 할 때 시점별 각 DMU의 m차원의 투입요소와 s차원의 산출요소는 다음과 같이 표현된다.

$$x_n^t = (x_{1n}^t, \dots, x_{mn}^t), y_n^t = (y_{1n}^t, \dots, y_{sn}^t)$$

DEA-윈도우분석을 사용하기 위하여 윈도우의 크기를  $W(1 \leq W \leq T)$ 라 정의하고, 윈도우의 시작시점을  $b(1 \leq b \leq T - W + 1)$ 라 정의하면, 수행평가 하는 기간은  $(b, W)$ 로 표시할 수 있다. 이는 b시점에서 시작해서  $b + W - 1$ 시점까지 자료를 가지고 실험을 수행한다는 의미를 가지고 있다.

$n = k$ 이고  $b = p$ 이며  $W = q$ 일때,  $p+a$  ( $0 \leq a \leq q-1$ ) 시점의 효율성 값을 구하기 위한 DEA-원도우분석을 표현하면 모형(4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \max \quad & E_k^{p,a} = \sum_{r=1}^s u_{rk}^{p+a} y_{rk}^{p+a} - w_k^{p+a} \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^m v_{ik}^{p+a} x_{ik}^{p+a} = 1 \\
 & \sum_{r=1}^s u_{rk}^{p+a} y_{rj}^{(p+l-1)} - \sum_{i=1}^m v_{ik}^{p+a} x_{ij}^{(p+l-1)} - w_k^{p+a} \leq 0, \\
 & j = 1, \dots, N, l = 1, \dots, q \\
 & v_{ik}^{p+a}, u_{rk}^{p+a} \geq 0, \quad \forall i, r \\
 & w_k^{p+a} : \text{unrestricted.}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

여기서  $E_k^{p,a}$ 는  $k$ 번째 DMU의 시작시점  $p$ 에서  $a$ 만큼 이후 시점에서 효율성을 나타내는 변수이며,  $a=0$ 일 때부터  $a=q-1$ 일 때까지의 효율성을 모두 구한 것은  $k$ 번째 DMU의  $(p,q)$ 기간의 효율성을 표현한 것이다.  $u_{rk}^{p+a}$ 와  $v_{ik}^{p+a}$ 는  $k$ 번째 DMU의  $p+a$ 시점의 산출요소와 투입요소의 계수를 의미하고,  $w_k^{p,a}$ 는  $k$ 번째 DMU의  $p+a$ 시점의 VRS를 의미하는 계수를 뜻한다. 그리고 첨자  $l$ 이 사용된 것은 동일 윈도우 안에 포함되어 있는 시점별 자료 각각을 표현하기 위함이다(박경삼 등, 2005).

DEA-원도우분석에서 매 상황이 독립적인 경우에  $W$ 의 값을 1로 설정하면, 모형 (4)의 수식은 곧 연속하는 상황이 비슷한 시점이 없는 것으로 판단되어 각기 다른 기간에 DMU의 효율성 값을 의미하며,  $k$ 번째 DMU는  $T$ 개 기간의 결과를 가지게 된다. 본 연구에서는 기간의 변화를 년도 별 유입량 변화로 설정하여, 어떠한 유입량이 오는 것과 상관없이 다른 DMU에 비해 효율성이 높고 안정적인 DMU를 선정하는 것을 목적으로 한다.

### 3. DEA-원도우분석을 활용한 최적화모형의 가중치 선정절차

본 연구에서 제시한 절차는 Fig. 1의 5단계로 진행되며 각 단계의 상세는 다음과 같다.

Table 3. DEA Input, Output Factors

DEA Factor	Description
Input Factor(Min)	Deviation from monthly target storage
Output Factor(Max)	Average hydroelectric energy generation

### 3.1 Step 1 : GA-CoMOM을 사용한 후보 가중치 집단 도출

Step 1에서는 과거자료의 평균유입량을 사용하여 GA-CoMOM을 수행한다. 이때, GA의 집단 규모(population size)는 생성하고자 하는 가중치 군의 수를 의미하며, GA-CoMOM을 통해 산출된 결과는 우수한 파레토 최적해에 대응되는 가중치군이 된다(Lee et al., 2007).

### 3.2 Step 2 : 선정된 파레토 최적해에 대응되는 가중치군을 후보 DMU로 선정

Step 2에서는 GA-CoMOM을 통해 얻은 파레토 최적해 집단에서 유사한 결과를 도출하는 가중치를 제외하고 대표성을 갖는 가중치들을 선별한다. 여기서 선정된 가중치군은 DEA 교차효율성 분석을 통해 평가할 후보 DMU가 된다.

### 3.3 Step 3 : 선정된 후보 가중치와 유입량 시나리오를 적용한 CoMOM수행

Step 2에서 선정된 DMU(가중치)가 변화하는 유입량 상황에서 적합한지, 즉 DEA관점에서 효율적인지 여부를 분석하기 전에 다양한 유입량 시나리오를 적용해서 CoMOM을 수행한다. 따라서 총 “후보 가중치의 수×유입량 시나리오의 수”만큼의 최적화를 수행한다.

### 3.4 Step 4 : DEA 교차효율성을 사용하여 선정된 후보 가중치 군의 적합성 평가

각 유입량 시나리오 별로 DMU의 효율성을 평가한다. 이때 DEA의 투입/산출 개념을 최적화 모형에 적용하여 투입은 최소화, 산출은 최대화 목적을 갖도록 목적함수를 구성한다. 본 연구에서는 Table 3과 같이 투입요소와 산출요소를 결정하였다. 평가방법은 수문상황의 변화에 따라 DMU들의 효율성 변동을 파악하기 위해 DEA-원도우분석을 사용한다. 이때 수자원 문제의 특성상 각 연도의 유입량은 독립적이기 때문에 각 연도가 모두 다른 환경에 놓여 있다고 보고, 윈도우의 크기는 1로 설정한다. DEA-원도우분석 기법을 사용할 때 DMU간의 순위 산정을 위해 교차효율성을 사용하며,

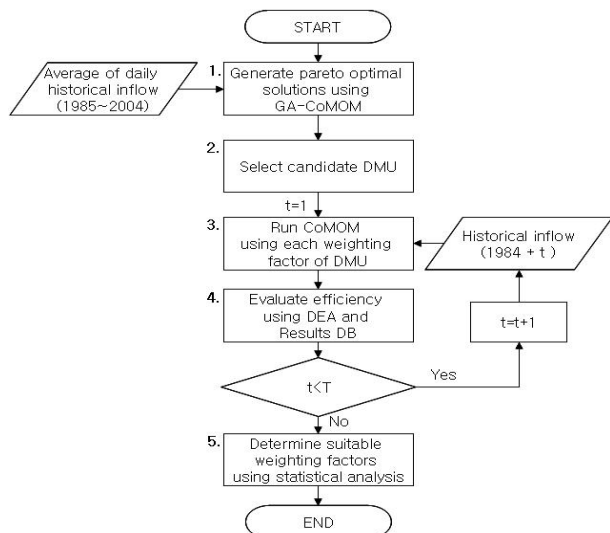


Fig. 1. Procedure to Determine Efficient Weight Coefficients under Inflow Variation

이때 다양한 순위산정 기법 중 교차효율성 분석을 사용한 이유는 자연 상태에 의해 피동적으로 결정되는 수문 상황의 특성을 반영하기 위해서는 평균적인 개념, 즉 각 DMU에게 유리한 조건을 반영하여 효율성을 평가하고 이들을 산술평균하는 교차효율성 분석이 적합하다고 판단되었기 때문이다.

### 3.5 Step 5 : 통계 분석을 통한 가중치 군 선정

Step 4에서 도출된 효율성 값을 토대로 유입량 변화에도 일관되게 좋은 결과를 제시해 주는 우수한 가중치 군이 있는 지를 살펴보고 그러한 가중치가 존재하면 해당 가중치를 선호 가중치로 선정한다. 그러나 그러한 가중치가 존재하지 않을 경우는 유입량 조건에 따라 변화하는 DMU의 순위를 평균, 표준편차, 상관분석, 분산분석 등의 통계분석을 통해 분석해서 각 DMU의 장단점을 파악한다. 가령, 순위의 평균은 비교적 다른 DMU보다 유입량이 변화하는 상황에서 얼마나 높은 교차효율성을 값을 주었는가를 나타내며, 표준편차는 유입량에 따라 얼마나 순위의 변동이 있었는지 보여준다. 또한 상관분석을 통해 유입량과 DMU효율성 간의 관계를 파악할 수 있으며, 분산분석을 통해 각 DMU들의 효율

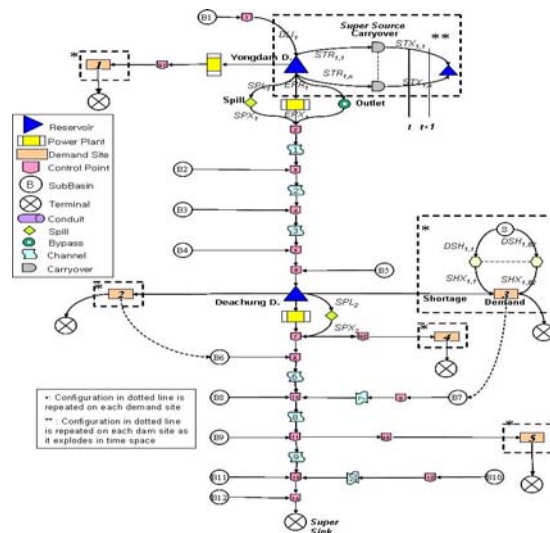


Fig. 2. Network Diagram of Guem-river

성 순위에 실제적인 차이가 존재하는 지를 검증해 볼 수도 있다.

## 4. 모형의 적용효과 및 결과 분석

### 4.1 자료 수집

본 연구에 적용한 금강 수계는 Fig. 2와 같은 네트워크로 단순화하여 구성할 수 있다. 금강 수계는 용담과 대청댐 등을 포함하며, 용담에 두 곳의 발전시설을 운영하고 전주권에 용수를 공급하고 있으며, 대청댐에서는 한 개의 발전시설을 운영하고 대전, 청주, 공주 권역에 용수 공급을 담당한다.

실험의 분석기간의 크기는 1개월, 단위기간은 1일로 설정했으며, 윈도우 분석 대상기간은 댐의 저수량이 풍부한 10월과 그렇지 않은 3월로 선정하였다. 초기저수위와 기말목표저수위와 같은 기본 수계 자료는 2002년 10월과 2003년 3월의 자료를 적용하였으며, 유입량 시나리오는 1985년부터 2004년까지의 금강 수계 유입량 자료를 사용하였다. Table 4는 이 자료에 대한 통계치를 정리한 것이다(건설교통부, 2001; 한국수자원공사, 2004).

Table 4. Statistic Data of Total Monthly Inflow for Guem-river (1985~2004)

(unit :  $10^6 m^3$ )

Inflow Information	October	March
Average of Inflow	340.848	231.070
Maximum of Inflow(Year)	1082.061(1998)	496.388(1988)
Minimum of Inflow(Year)	49.425(1988)	118.627(1999)
Standard Deviation	297.314	109.219

## 4.2 단계별 수행 및 실험결과

### 4.2.1 GA-CoMOM을 사용한 파레토 최적해 도출

초기 가중치군을 도출하기 위해 2002년 10월의 초기 저수위와 과거 20년간의 평균유입량을 적용해서 GA-CoMOM을 수행하였다. GA-CoMOM은 Table 5와 같이 실험조건이 적용되며, Table 1의 기본가중치를 근간으로  $Z_0$ 에 해당하는 용담과 대청의 저수가중치를 GA의 결정변수로 적용해서 진화를 수행한다. Fig. 3(a)는 GA-CoMOM이 도출한 각 가중치들의 수행결과를 평균저수량과 평균발전방류량을 축으로 도시화한 것이다.

### 4.2.2 평가할 DMU 선정

Step 1에서 생성된 30개의 후보 가중치 중 유사한 결과를 도출한 것들을 제거하고 10개를 가중치 군을 DEA의 분석대상 DMU로 선별하였다. Fig. 3(a)의 회색 점은 선정된 DMU를 의미하며, 선출된 DMU의

CoMOM 수행 결과는 Table 6과 같다.

### 4.2.3 후보 가중치와 유입량 시나리오를 적용한 CoMOM수행

10개의 선정된 후보 DMU를 적용해서 20년 간(1985년~2004년)의 연간 유입량자료를 입력해 총 200회 (=DMU 개수(10개)×유입량자료(20년))의 CoMOM수행을 반복하면 유입량에 상황에 따라 각 가중치의 적합성이 어떻게 변하는 지 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 20년간의 유입량 중 유량 순위 1, 5, 10, 15, 20인 것에 해당하는 CoMOM수행 결과를 도시한 것이며, 자세한 결과는 Table 7과 Table 8에서 확인할 수 있다. 평균저수량과 평균발전방류량을 기준으로 월별 결과를 비교하여 보면 전체적으로 10월에 유량이 풍부하기 때문에 저수량과 발전량 측면에서 3월보다 높은 모습을 보이고 있으며, 가장 많은 유입량이 들어왔을 때와 가장 적은 유입량이 들어왔을 때의 폭도 10월이 큰 것으로 나타난다.

Table 5. Experimental Conditions for GA-CoMOM

Conditions	Value <sup>5)</sup>
Population Size	30
Maximum Number of Iteration	5
Crossover Probability	0.9
Mutation Probability	1.0

Table 6. Results of CoMOM for Each DMU under Average Inflow

No.	Weight on Storage of Yongdam	Weight on Storage of Daechung	Average Storage ( $10^6 m^3$ )	Average of Hydropower Release ( $10^6 m^3$ )	Deviation from Monthly Target of Yongdam ( $10^6 m^3$ )	Deviation from Monthly Target of Daechung ( $10^6 m^3$ )	Average of Hydroelectric Generation (GWh)
1	$5 \times 10^{-2}$	$6 \times 10^{-2}$	1319.86	24.70	-26.59	-540.45	2.927
2	$5 \times 10^{-1}$	$6 \times 10^{-4}$	1337.19	23.85	0.00	-540.45	2.567
3	$3 \times 10^2$	$5 \times 10^{-2}$	1351.24	23.14	21.89	-540.45	2.404
4	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-1}$	1568.35	13.85	-26.59	-203.88	1.998
5	$5 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-1}$	1613.04	9.96	-26.59	-83.41	1.602
6	$1.1 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^0$	1622.75	8.66	-26.59	-43.25	1.463
7	$1.1 \times 10^6$	$1 \times 10^0$	1636.47	8.17	21.89	-76.45	1.046
8	$1.4 \times 10^1$	$1.5 \times 10^0$	1648.09	6.27	19.90	-15.37	0.852
9	$9 \times 10^3$	$1.2 \times 10^1$	1652.63	4.96	21.89	23.07	0.703
10	$1.4 \times 10^1$	$1.5 \times 10^4$	1654.57	3.67	7.62	77.23	0.560

5) 통상 GA의 모집단 크기는 100이상으로 충분히 크게 부여하지만, 이 들 중 하나를 선택해야 하는 의사결정자에게 줄 수 있는 부담을 고려한다면 20~30개 이하가 적당할 것으로 보인다. 진화 세대 수의 경우 5회 이후 해의 개선도가 크게 둔화되어 5로 설정하였으며, 교차확률과 돌연변이 확률은 일반적으로 사용하는 값으로 임의 설정하였다.



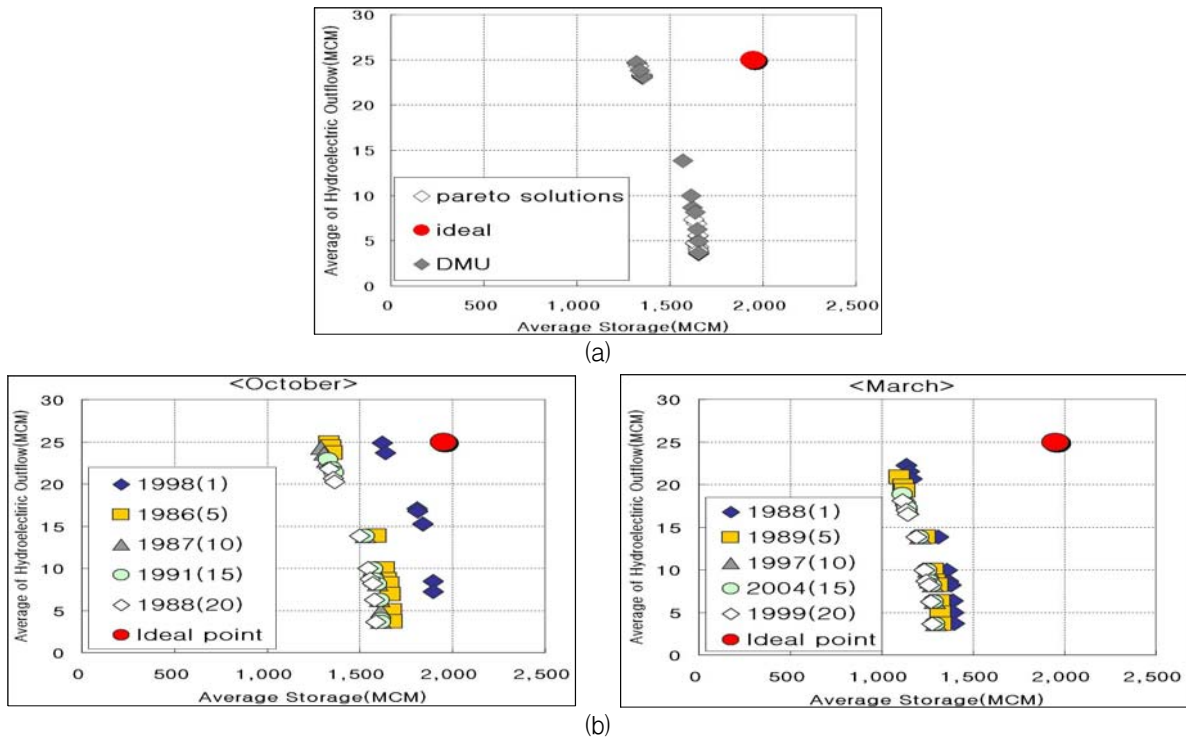


Fig. 3. (a) Selected DMUs; (b) CoMOM Results of Each DMU for Different Inflow Scenarios.

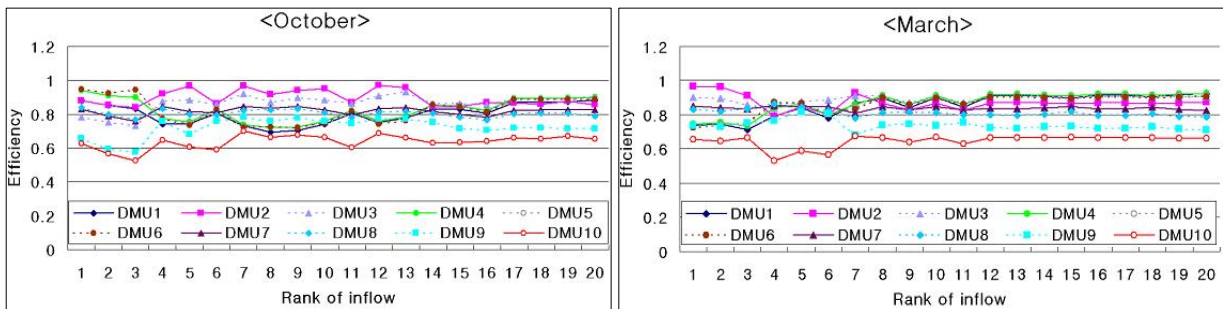


Fig. 4. Cross-efficiency of Each DMU for Inflow Variation

#### 4.2.4 DEA 교차효율성을 사용한 효율성 평가

Table 7과 Table 8의 우측 3개 열과 같은 DEA 자료를 입력해서 DMU의 효율성을 평가한다. DEA-윈도우 분석에서 20년간의 유입량 변화는 수문상황의 변화추이를 의미하며, DEA윈도우 분석은 수문상황의 시간적 변화에 따라 DMU의 효율성이 어떻게 반응하는지를 살펴보기 위함이다. 여기서 각 DMU의 순위를 판단하기 위해서 교차효율성을 사용하였으며, 이때 도출된 각 DMU의 순위는 각 유입량 상황에 따라 다른 DMU에 비해 상대적으로 얼마나 좋은 효율성을 갖는지를 나타낸다. Fig. 4는 유입량 순위별로 정리한 교차효율성을 나타낸 그림이며, 유입량 변화에 따라 DMU 효율성의 어떻게 변하는 지를 보여줄 수 있다. 또한 Table 9와 Table 10은 유입량변화별 효율성 순위결과를 정리한 것이다. 맨

위 2,3번째 행은 용담, 대청저수가중치를 표시한 것이며 4,5번째 행의 Priority는 각 DMU의 특징을 요약한 것으로, 가령 DMU3의 “H”와 “YD”는 저수보다는 발전에 높은 가중치를 두고, 각 댐의 저수 가중치에 대한 상대적 크기는 용담이 대청보다 크다는 것을 의미한다.

#### 4.2.5 통계 분석을 통한 안정적 가중치 군 선정

Table 9는 10월에 대한 실험 결과이다. 자세히 살펴보면, DMU3의 평균 순위가 높고 표준편차가 크지 않았기 때문에 가장 좋은 DMU로 볼 수 있다. 뒤를 이어 DMU2가 평균 순위가 높았는데, 가장 순위가 높은 DMU3을 기준으로 DMU2, DMU4, DMU5등의 평균 순위의 차이가 유의한지를 판단하기 위해 일원배치 분산 분석을 수행하였다. 귀무가설을 “두 집단의 평균이 같다”로 설정하고 유의수준  $\alpha$ 를 0.05로 설정하였을 때,

Table 7. Results of CoMOM for Each DMU under Inflow Variation (October)

		Objective Function Value of CoMOM		Data for DEA		
Year (Rank of Inflow)	No.	Average Storage ( $10^6 m^3$ )	Average of Hydropower Release ( $10^6 m^3$ )	DEA Input		DEA Output
				Deviation from Monthly Target of Yongdam ( $10^6 m^3$ )	Deviation from Monthly Target of Daechung ( $10^6 m^3$ )	Average of Hydroelectric Generation (GWh)
1986 (5)	1	1335.53	24.86	-14.76	-509.12	2.96
	2	1346.66	24.42	0.00	-510.39	2.78
	3	1353.78	23.72	33.72	-522.25	2.47
	4	1588.79	13.85	-14.76	-167.78	2.02
	5	1633.48	9.96	-14.76	-47.30	1.61
	6	1643.20	8.66	-14.76	-7.14	1.47
	7	1656.91	8.17	33.72	-40.34	1.06
	8	1665.25	6.92	32.16	0.00	0.93
	9	1673.08	4.96	33.72	59.18	0.71
	10	1675.01	3.67	19.46	113.34	0.56
1987 (10)	1	1291.28	24.33	-20.97	-540.45	2.85
	2	1306.36	23.65	0.00	-540.45	2.56
	3	1322.35	22.77	27.51	-540.45	2.33
	4	1528.22	13.85	-20.97	-215.42	1.97
	5	1572.91	9.96	-20.97	-94.95	1.59
	6	1582.63	8.66	-20.97	-54.79	1.45
	7	1596.34	8.17	27.51	-87.99	1.03
	8	1607.96	6.27	25.52	-26.91	0.84
	9	1612.51	4.96	27.51	11.53	0.70
	10	1614.44	3.67	13.24	65.69	0.56
1988 (20)	1	1334.98	21.80	-50.28	-540.45	2.63
	2	1355.22	20.68	-15.81	-540.45	2.19
	3	1364.41	20.23	-1.80	-540.45	2.11
	4	1498.64	13.87	-50.28	-294.78	1.95
	5	1543.20	10.00	-50.28	-174.87	1.57
	6	1553.14	8.70	-50.28	-134.50	1.44
	7	1566.83	8.21	-1.80	-167.66	1.02
	8	1578.65	6.26	-1.80	-107.32	0.82
	9	1585.38	3.64	-1.80	-26.17	0.54
	10	1585.39	3.64	-14.93	-12.87	0.54
1991 (15)	1	1329.87	22.95	-40.38	-540.45	2.75
	2	1350.07	21.87	-7.04	-540.45	2.32
	3	1360.00	21.38	8.10	-540.45	2.23
	4	1525.77	13.85	-40.38	-258.34	1.97
	5	1570.46	9.96	-40.38	-137.87	1.58
	6	1580.17	8.66	-40.38	-97.71	1.45
	7	1593.89	8.17	8.10	-130.91	1.03
	8	1605.51	6.27	6.11	-69.83	0.84
	9	1611.71	3.95	8.10	0.00	0.58
	10	1612.02	3.64	-5.02	22.77	0.54
1998 (1)	1	1619.78	24.86	31.07	-250.64	3.27
	2	1619.78	24.86	31.07	-250.64	3.27
	3	1638.03	23.72	79.55	-263.76	2.77
	4	1808.87	17.06	31.07	-8.90	2.51
	5	1812.89	16.77	31.07	0.00	2.48
	6	1812.89	16.77	31.07	0.00	2.48
	7	1839.82	15.21	79.55	0.00	1.95
	8	1840.12	15.26	77.99	0.00	1.99
	9	1893.55	8.45	79.55	209.49	1.17
	10	1894.60	7.25	76.72	249.54	1.02

Table 8. Results of CoMOM for Each DMU under Inflow Variation (March)

		Objective Function Value of CoMOM		Data for DEA		
Year (Rank of Inflow)	No.	Average Storage ( $10^6 m^3$ )	Average of Hydropower Release ( $10^6 m^3$ )	DEA Input		DEA Output
				Deviation from Monthly Target of Yongdam ( $10^6 m^3$ )	Deviation from Monthly Target of Daechung ( $10^6 m^3$ )	Average of Hydroelectric Generation (GWh)
1986 (5)	1	1132.27	22.25	2.61	-22.69	-445.92
	2	1147.99	21.52	2.31	0.00	-445.92
	3	1162.05	20.69	2.11	25.79	-445.92
	4	1308.63	13.85	1.91	-22.69	-185.42
	5	1353.32	9.96	1.54	-22.69	-64.94
	6	1363.04	8.66	1.41	-22.69	-24.79
	7	1376.61	8.18	1.01	25.79	-58.27
	8	1387.78	6.37	0.83	23.79	0.00
	9	1392.78	4.97	0.68	25.79	41.28
	10	1394.71	3.68	0.54	11.26	95.69
1987 (10)	1	1098.35	20.86	2.44	-42.87	-445.92
	2	1117.98	19.77	2.01	-9.01	-445.92
	3	1127.26	19.30	1.94	5.61	-445.92
	4	1238.18	13.85	1.87	-42.87	-228.36
	5	1282.87	9.96	1.51	-42.87	-107.88
	6	1292.59	8.66	1.38	-42.87	-67.72
	7	1306.16	8.18	0.98	5.61	-101.20
	8	1317.78	6.27	0.80	3.62	-40.09
	9	1322.43	4.92	0.66	5.61	0.00
	10	1324.30	3.65	0.52	-7.79	52.75
1988 (20)	1	1118.99	18.83	2.26	-49.20	-445.92
	2	1138.27	17.77	1.85	-16.48	-445.92
	3	1146.61	17.26	1.76	-0.72	-445.92
	4	1210.43	13.85	1.85	-49.20	-291.51
	5	1255.12	9.96	1.49	-49.20	-171.04
	6	1264.84	8.66	1.37	-49.20	-130.88
	7	1278.42	8.18	0.97	-0.72	-164.36
	8	1290.07	6.24	0.78	-0.72	-104.12
	9	1296.55	3.65	0.51	-0.72	-23.80
	10	1296.55	3.65	0.51	-14.12	-10.40
1991 (15)	1	1113.32	18.09	2.18	-67.27	-445.92
	2	1132.68	17.00	1.76	-33.42	-445.92
	3	1140.44	16.53	1.68	-18.79	-445.92
	4	1188.83	13.85	1.84	-67.27	-314.38
	5	1233.52	9.96	1.48	-67.27	-193.90
	6	1243.24	8.66	1.36	-67.27	-153.75
	7	1256.81	8.18	0.96	-18.79	-187.23
	8	1268.47	6.24	0.77	-18.79	-126.99
	9	1274.95	3.65	0.51	-18.79	-46.67
	10	1274.95	3.65	0.51	-32.19	-33.27
1998 (1)	1	1111.38	18.86	2.25	-47.51	-445.92
	2	1130.80	17.76	1.83	-13.65	-445.92
	3	1139.00	17.29	1.75	0.97	-445.92
	4	1203.48	13.85	1.85	-47.51	-290.58
	5	1248.17	9.96	1.49	-47.51	-170.11
	6	1257.89	8.66	1.37	-47.51	-129.95
	7	1271.46	8.18	0.97	0.97	-163.43
	8	1283.11	6.25	0.78	0.00	-102.75
	9	1289.60	3.65	0.51	0.97	-22.87
	10	1289.60	3.65	0.51	-12.43	-9.47

Table 9. Rank of the Efficiency of DMUs for Varied Inflow Scenarios (October)

DMU		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Weight on Storage of YongDam(YD)		$5 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^2$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^6$	$1.4 \times 10^1$	$9 \times 10^3$	$1.4 \times 10^1$	
Weight on Storage of DaeChung(DC)		$6 \times 10^{-2}$	$6 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-1}$	$8 \times 10^{-1}$	$1.1 \times 10^0$	$1 \times 10^0$	$1.5 \times 10^0$	$1.2 \times 10^1$	$1.5 \times 10^4$	
Priority	Hydroelectricity(H) vs. Storage(S)	H	H	H	H	H	H	S	S	S	S	
	Yongdam vs. Daechung		YD	YD	DC	DC	DC	YD	YD	YD	DC	
Rank of Inflow	High Inflow	1	4	4	8	3	1	1	7	6	9	10
		2	4	4	8	3	1	1	7	6	9	10
		3	5	4	8	3	1	1	7	6	9	10
		4	9	1	2	5	6	7	3	4	8	10
		5	6	1	2	5	7	8	3	4	9	10
		6	7	1	2	3	4	5	6	8	9	10
		7	7	1	2	6	8	9	3	4	5	10
		8	9	1	2	8	7	6	3	4	5	10
		9	9	1	2	6	7	8	3	4	5	10
		10	9	1	2	5	7	8	3	4	6	10
	Average		6.9	1.9	3.8	4.7	4.9	5.4	4.5	5	7.4	10
	Std. Deviation		2.08	1.45	2.90	1.70	2.88	3.24	1.96	1.41	1.90	0.00
	Low Inflow	11	8	1	2	3	4	5	6	7	9	10
		12	10	1	2	7	8	9	3	4	5	6
		13	7	1	2	6	8	9	3	4	5	10
		14	7	5	1	4	2	3	6	8	9	10
		15	6	5	1	2	3	4	7	8	9	10
		16	7	1	2	3	4	5	6	8	9	10
		17	6	5	1	2	3	4	7	8	9	10
		18	5	6	1	2	3	4	7	8	9	10
19		6	5	1	2	3	4	7	8	9	10	
20		5	6	1	2	3	4	7	8	9	10	
Average		5.8	3.6	1.6	2.8	4.1	5.3	6.2	7.2	8.4	10	
Std. Deviation		0.63	2.32	0.52	1.62	2.13	2.00	1.69	1.69	1.35	0.00	
Average Rank		6.35	2.75	2.7	3.75	4.5	5.35	5.35	6.1	7.9	10	
Standard Deviation		1.60	2.07	2.32	1.89	2.50	2.62	1.98	1.89	1.68	0.00	
Correlation Coefficient		-0.35	0.02	0.97	0.03	-0.43	-0.56	0.15	-0.21	0.16	-	

DMU2와 DMU3의 비교와 DMU3와 DMU4의 비교에서만 p-값(p-value)이 각각 0.9430와 0.1247로 기각치보다 커서 귀무가설을 기각할 수 없었으며, DMU3과 DMU5의 비교결과에서는 p-값이 0.0236로 귀무가설이 기각되었다. 따라서 DMU2와 DMU4를 제외하고 모두 DMU3과 평균의 차이가 있는 것으로 나타나므로 DMU3이 나머지 DMU들보다 평균에서 우위에 있는 것으로 판정할 수 있다. DMU2와 DMU4의 경우 DMU3에 비해 열세라고 단정 지을 수는 없다. 즉, DMU2와 DMU4는 유입량에 따라 선택적으로 적용할 필요가 있다고 판단된다.

유입량 변화에 대해 세부적으로 각 DMU를 분석하여 보면 다음과 같다. 먼저 유입량이 많을 때(유입량 순

위 : 1~10위), DMU10과 DMU1과 같이 저수나 발전에 치우친 가중치보다 나머지 DMU와 같이 발전과 저수를 모두 고려한 경우가 대체적으로 좋은 효율을 보였다. 또한 DMU2와 DMU3이 DMU4, DMU5, DMU6보다 순위가 높고 DMU7, DMU8, DMU9가 DMU10보다 순위가 높은 것으로 보아 용담댐에 가중치를 준 경우가 대청댐에 가중치를 준 경우 보다 결과가 양호하다는 것을 알 수 있었다. Table 1의 Z<sub>7</sub>에 해당하는 발전가중치의 고정값 10과 비교하여 용담 저수가중치가 높은 DMU3보다는 용담 저수가중치가 낮은 DMU2쪽의 결과가 좋았다. 결과적으로 10월의 유입량이 많은 경우는 전체적으로 저수가중치를 낮게 하여 발전에 주안점을 두되,

Table 10. Rank of the Efficiency of DMUs for Varied Inflow Scenarios (March)

DMU		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Weight on Storage of Yongdam(YD)		$5 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^2$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^6$	$1.4 \times 10^1$	$9 \times 10^3$	$1.4 \times 10^1$	
Weight on Storage of Daechung(DC)		$6 \times 10^{-2}$	$6 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-1}$	$8 \times 10^{-1}$	$1.1 \times 10^0$	$1 \times 10^0$	$1.5 \times 10^0$	$1.2 \times 10^1$	$1.5 \times 10^4$	
Priority	Hydroelectricity(H) vs. Storage(S)	H	H	H	H	H	H	S	S	S	S	
	Yongdam vs. Daechung		YD	YD	DC	DC	DC	YD	YD	YD	DC	
Rank of Inflow	High Inflow	1	6	1	2	5	8	9	3	4	7	10
		2	6	1	2	5	7	8	3	4	9	10
		3	9	1	2	8	7	5	4	3	6	10
		4	7	8	6	5	2	1	4	3	9	10
		5	8	5	1	4	3	2	6	7	9	10
		6	9	5	1	6	7	8	2	3	4	10
		7	3	1	2	4	5	6	7	8	9	10
		8	4	6	2	1	3	5	7	8	9	10
		9	5	6	1	3	2	4	7	8	9	10
		10	4	6	1	2	3	5	7	8	9	10
	Average		6.1	4	2	4.3	4.7	5.3	5	5.6	8	10
	Std. Deviation		2.13	2.71	1.49	2.00	2.36	2.58	2.00	2.37	1.76	0.00
	Low Inflow	11	5	7	1	3	2	4	6	8	9	10
		12	2	6	3	1	4	5	7	8	9	10
		13	2	6	4	1	3	5	7	8	9	10
		14	3	6	2	1	4	5	7	8	9	10
		15	4	6	1	2	3	5	7	8	9	10
		16	2	6	4	1	3	5	7	8	9	10
		17	2	6	4	1	3	5	7	8	9	10
		18	4	6	2	1	3	5	7	8	9	10
19		2	6	4	1	3	5	7	8	9	10	
20		2	6	5	1	3	4	7	8	9	10	
Average		2.8	6.1	3	1.3	3.1	4.8	6.9	8	9	10	
Std. Deviation		1.14	0.32	1.41	0.67	0.57	0.42	0.32	0.00	0.00	0.00	
Average Rank		4.5	5.1	2.5	2.8	3.9	5.1	6.0	6.8	8.5	10.0	
Standard Deviation		2.37	2.16	1.50	2.12	1.86	1.82	1.70	2.04	1.32	0.00	
Correlation Coefficient		0.72	-0.71	-0.22	0.82	0.72	0.34	-0.80	-0.80	-0.42	-	

용담은 저수 위주로 대청은 발전위주로 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 한편, 유입량이 적을 때(유입량 순위 : 11~20위)는 앞선 결과와 대체적으로 비슷한 결과를 주었으나, 특별히 용담 저수가중치가 발전가중치 10보다 높은 DMU3이 그렇지 않은 DMU2보다 좋은 결과를 주는 것으로 나타났다. 결과적으로 10월의 유입량이 적은 경우는 유입량이 많은 경우와 마찬가지로 역시 발전에 주안점을 두지만, 용담의 저수가중치를 발전가중치 보다 높게 설정하여 저수를 배려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Table 10은 3월에 대한 실험 결과이다. 우선 DMU3의 평균 순위가 높고 표준편차가 크지 않기 때문에 가

장 좋은 DMU로 볼 수 있다. 그 뒤를 이어 DMU4와 DMU5가 평균 순위가 높았는데, DMU3을 기준으로 평균 순위가 실제로 차이가 나는지 확인하기 위해 일원배치 분산분석을 수행하였다. 그 결과 DMU3과 DMU4의 비교분석의 경우 p-값은 0.4389이었고, DMU3과 DMU5의 비교분석 시 p-값이 0.0057이었다. 따라서 DMU3이 DMU4를 제외한 나머지 DMU들 보다는 우위에 있는 것으로 볼 수 있다. DMU4의 경우 DMU3과 평균 순위에 유의한 차이가 없는 것으로 나타났지만 유입량에 따라 순위 변동이 심하여 유입량이 적을 경우에 선택적으로 적용할 필요가 있다고 판단된다.

유입량의 변화에 따라 각 DMU의 효율성을 세부적

으로 살펴보면 다음과 같다. 우선, 3월의 경우에도 유입량이 많을 때는 대체로 10월의 결과와 유사한 결론을 내릴 수 있다. 즉, 저수나 발전에 치우쳐 가중치를 주는 것 보다는 저수와 발전을 모두 고려하되 발전에 무게를 실는 것이 좋은 결과를 주었고, 용담댐에 가중치를 준 경우가 대청댐에 가중치를 준 경우 보다 결과가 양호하다는 것을 알 수 있었다. 특히 3월이 건기임에도 유입량이 아주 많은 경우에는 10월과 비슷하게 DMU2가 가장 좋은 가중치로 선정되어, 일반적으로 유입량이 많은 경우 DMU2가 매우 효율적 가중치라고 판단되었다. 하지만 3월에 유입량이 적을 경우에는 10월과 조금 다른 양상을 보였다. 즉, DMU4와 같이 대청의 저수 가중치를 높인 경우도 유입량이 적을 때는 순위가 높음을 확인할 수 있다. 이상에서 볼 때, 3월 유입량이 적을 것으로 예상되면 저수에 다소 주안점을 두되, 대청의 저수 가중치도 조금 높게 하여 저수를 배려하는 것이 바람직할 것이라고 판단된다.

## 5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 파레토 최적해들에 대한 선호순위가 유입량의 변화에 따라 얼마나 민감하게 변화하는 지 살펴보고 유입량 변화에 덜 민감하면서 파레토 최적해 전방선에 근접하는 해를 도출할 수 있는 가중치 군을 선정하는 절차를 제시하였다. 이 절차는 크게 GA-CoMOM을 통해 파레토 최적해 집단과 여기에 대응되는 후보 가중치군을 도출하여 “DMU수×유입량 시나리오 수”만큼의 CoMOM 최적화를 반복한 후, DEA-원도우분석과 교차효율성 분석으로 유입량 변화에 따른 각 가중치의 효율성을 평가해서 이를 토대로 선호가중치를 선정하는 단계로 나눌 수 있다. 제안된 절차를 통해 금강수계의 10월과 3월에 적합한 가중치를 선정해 보았다. 1985~2004년의 과거 유입량 자료를 이용하여 분석한 결과, 10월의 경우 유입량의 변화에 따른 변동은 있었지만 대체적으로 발전에 중점을 두는 가중치를 사용하는 것이 좋은 결과를 도출했으며, 대청보다는 용담댐의 저수가중치를 높게 주는 것이 평균적으로 나은 결과를 가져왔다. 3월의 경우는 전체적으로 10월과 유사한 가운데, 유입량이 적을 것으로 예상되면 저수에 다소 주안점을 두되, 대청의 저수가중치도 조금 높게 하여 저수를 배려하는 것이 바람직할 것이라고 판단된다.

본 연구에서 제시한 결과는 용담, 대청 두 댐이 직렬로 이루어진 금강 수계와 같이 단순한 수계에 적용된 것이므로 결과가 상식에 맞는지 쉽게 판가름 된다. 분

석 결과는 기존 상식에 부합하므로 본 연구에서 제시한 방법이 합리적이라는 것을 보여준다. 따라서 좀 더 복잡한 수계에 제시한 절차를 적용하여도 계산상이나 분석상의 어려움만 극복한다면, 적용할 수 있다는 가능성을 엿 볼 수 있다. 다만 유입량의 계절적인 변화 패턴이 있으므로 일관성을 찾을 수 있으리라는 기대는 있지만, 매년 수문 상황이 변함에 불구하고, 한강 수계처럼 복잡한 수계에서도 가중치 할당에 대한 일관성을 도출할 수 있을지는 현재로서는 추정이 어렵다. 따라서 향후에는 수문 상황의 변화 양상을 몇 가지의 패턴으로 구분해서 각 수문 패턴에 적절한 가중치를 도출하는 등, 복잡한 수문 조건에서도 일관성 있게 활용할 수 있는 가중치를 도출하기 위한 연구를 수행할 필요가 있다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-6-3)과 두뇌한국21 2단계 사업의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다. 그리고 모형 개발 및 수행에 사용된 ILOG 소프트웨어를 고려대학교에 기증해 주신 KSTEC에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 건설교통부 (2001). **수자원장기종합계획(Water Vision 2020)**.
- 김승권, 박영준 (1998). “댐군의 연계운전을 위한 수학적 모형.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 779-793.
- 김승권 (2006). “수자원 공학에서의 최적화 기법의 활용(Ⅲ).” **한국수자원학회지(물과 미래)**, 한국수자원학회, 제39권, 제9호, pp. 83-94.
- 김재희, 김승권, 고익환 (2007). “다중 목적 저수지 운영 문제를 위한 CBITP와 NSGA-II의 비교.” **2007 대한토목학회 정기학술대회 발표논문집**, 대한토목학회, pp. 1433- 1436.
- 박경삼, 김운태, 정홍식 (2005). “DEA 및 DEA원도우 분석을 이용한 대규모 종합병원의 시대별 경영효율성 변화분석.” **경영학연구**, 한국경영학회, 제34권, 제1호, pp. 267-287.
- 전승목, 김재희, 김승권 (2008). “DEA 순위결정절차를 이용한 파레토 최적해 평가 -저수지 최적 방류 계획 선정을 중심으로-.” **IE Interfaces**, 대한산업공학회 (인쇄중).
- 한국수자원공사 (2004). **다목적댐 운영 실무편람**.

- Adler, N., Friedman, L., and Sinuany-Stern, Z. (2002). "Review of ranking methods in the data envelopment analysis context." *European Journal of Operational Research*, Elsevier, Vol. 140, pp. 249-265.
- Banker, R.D., Charnes, A., and Cooper, W.W. (1984). "Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis." *Management Science*, INFORMS, Vol. 30, No. 9, pp. 1078-1092.
- Charnes, A., Cooper, W.W., and Rhodes, E. (1978). "Measuring the efficiency of decision making units." *European Journal of Operational Research*, Elsevier, Vol. 2, pp. 429-444.
- Charnes, A., Clark, C.T., Cooper, W.W., and Golany, B. (1985). "A development study of data envelopment analysis in measuring the efficiency of maintenance units in the U.S. air forces." *Annals of Operations Research*, Baltzer Science Publishers, Vol. 2, No. 1, pp. 95-112.
- Doyle, J., and Green, R. (1994). "Efficiency and cross-efficiency in data envelopment analysis: derivatives, meanings and uses." *Journal of the Operational Research Society*, Operational Research Society, Vol. 45, No. 5, pp. 567-578.
- Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002). "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, IEEE, Vol. 6, No. 2, pp. 182-197.
- Hwang, C.L., and Lin, M.J. (1987). *Group decision making under multiple criteria*. Springer Verlag, Berlin.
- Kim, J.H., and Kim, S.K. (2006). "A CHIM based interactive tchebycheff procedure for multiple objective decision making." *Computers and Operations Research*, Elsevier, Vol. 33, No. 6, pp. 1577-1574.
- Kim, S.K., Lee, Y.D., Kim, J.H., and Ko, I.H. (2005). "A multiple objective mathematical model for daily coordinated multi-reservoir operation." *Water Science and Technology : water supply*, International Water Association, Vol. 5, No. 3-4, pp. 81-88.
- Labadie, J.W. (2004). "Optimal operation of multireservoir systems: state-of-art review." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 130, No. 2, pp. 93-111.
- Lee, Y.D., Kim, S.K., and Ko, I.H. (2007). "Genetic algorithm to determine weighting factors in multiple objective reservoir operation model under inflow uncertainty." *Working Paper*, Korea University.
- Simonovic, S., and Marino, M. (1982). "Reliability programming in reservoir management 3: systems of multi-purpose reservoirs." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 18, No. 4, pp. 735-743.
- Steuer, R.E. (1986). *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*. John Wiley & Sons, New York.
- Yeh, W.W.-G. (1985). "Reservoir management and operations models : A state of art review." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 21, No. 12, pp. 1797-1818.
- (논문번호:07-127/접수:2007.11.09/심사완료:2007.12.07)