

# 유입량의 변동성을 고려한 Fuzzy DEA 기반의 댐 군 연계운영 가중치 대안 평가

김용기<sup>1</sup> · 김재희<sup>2</sup> · 김승권<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 정보경영공학전문대학원 / <sup>2</sup>전북대학교 경영학부 / <sup>3</sup>고려대학교 기술경영전문대학원

## An Evaluation of Multi-Reservoir Operation Weighting Coefficients Using Fuzzy DEA taking into account Inflow Variability

Yongki Kim<sup>1</sup> · Jaehye Kim<sup>2</sup> · Sheung-Kown Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Information Management and Security, Korea University

<sup>2</sup>Division of Business Administration, Chonbuk National University

<sup>3</sup>School of Industrial Management Engineering, Korea University

The multi-reservoir operation problem for efficient utilization of water resources involves conflicting objectives, and the problem can be solved by varying weight coefficient on objective functions. Accordingly, decision makers need to choose appropriate weight coefficients balancing the trade-offs among multiple objectives. Although the appropriateness of the weight coefficients may depend on the total amount of water inflow, reservoir operating policy may not be changed to a certain degree for different hydrological conditions on inflow. Therefore, we propose to use fuzzy Data Envelopment Analysis (DEA) to rank the weight coefficients in consideration of the inflow variation. In this approach, we generate a set of Pareto-optimal solutions by applying different weight coefficients on Coordinated Multi-reservoir Operating Model. Then, we rank the Pareto-optimal solutions or the corresponding weight coefficients by using Fuzzy DEA model. With the proposed approach, we can suggest the best weight coefficients that can produce the appropriate Pareto-optimal solution considering the uncertainty of inflow, whereas the general DEA model cannot pinpoint the best weight coefficients.

**Keyword:** fuzzy DEA, weight coefficient, reservoir operation, inflow variation, CoMOM

### 1. 서론

수자원의 효율적 운영을 위한 저수지군 연계 운영 문제는 가용한 수자원의 범위 내에서 적절한 용수공급을 위한 최적의 방류량을 결정하는 것을 의미한다. 하지만 경제성에 기반을 둔 과거의 최적화 저수지 연계운영 모형은 단일 목적 함수를 가정함으로써 다양한 목적들을 동시에 고려해야 하는 저수지

운영의 현실과 동떨어진 결과를 도출하곤 하였다.

다목적 계획법(Multiple Objective Programming)은 다수의 목적을 동시에 고려할 수 있는 기법으로, 파레토 최적 관점에서 열등하지 않은 해를 도출하는 것을 목적으로 한다. 이 문제를 위한 가장 단순한 해법으로 목적함수에 대한 가중치를 변경시켜 가면서 다수의 파레토 최적해를 도출할 수 있는 가중 합계법(weighted-sums method)을 적용할 수 있으며, 이와 달리 유사한 성

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구지원(과제번호 1-6-3)에 의해 수행되었음.

\*연락처 : 김승권 교수, 136-701 서울시 성북구 안암동 5가 1번지 고려대학교 기술경영전문대학원,

Fax : 02-929-5888, E-mail : kimsk@korea.ac.kr

투고일(2011년 02월 01일), 심사일(1차 : 2011년 04월 11일), 게재확정일(2011년 04월 26일).

격의 매개변수를 활용하여 균일하게 분포된 파레토 최적해 집단을 도출할 수 있는 CBITP(Convex hull of individual maxima Based Interactive Tchebycheff Procedure)(Kim and Kim, 2006) 등을 고려해 볼 수 있다. 그러나 목적함수에 대한 효용함수가 존재하지 않은 일반적인 상황에서 각 파레토 최적해, 또는 파레토 최적해에 대응되는 목적함수 가중치, 또는 가중치 역할을 하는 계수에 대한 우선순위를 정하고 가장 적합한 가중치를 선정하는 문제는 간단한 일이 아니다.

이 문제를 해결하기 위해 최근 Kim *et al.*(2008) 등은 다수의 파레토 최적해 집단 중 최선의 파레토 최적해와 이에 대응하는 목적함수 가중치를 선정하기 위해 다요소 의사결정 기법 중 하나인 자료포락분석(Data Envelopment Analysis, DEA)을 활용하였다. 그들은 다수의 입출력 요소를 동시에 고려해서 효율적 대안을 선별할 수 있는 DEA를 활용하여 목적함수 가중치들에 대한 적합도 평가를 수행하였다. 그리고 각 유입량 시나리오 별로 적합한 가중치를 제시하였다. 그러나 유입량을 사전에 알 수 없다는 점을 고려할 때 불확실한 상황을 고려한 가중치의 선정이라는 목적을 달성하는 데는 한계가 있다. 일례로 발전보다 저수에 주안점을 둔 특정한 목적함수 가중치를 상정해보면, 이 가중치는 유입량이 작을 때는 적합한 편이지만, 반대로 유입량이 과다할 때는 좋은 선택이 아닌 것이 자명하다. 따라서 유입량 자료의 변동성을 고려하여 각 파레토 최적해들을 평가하고, 불확실한 상황 하에서 적절한 파레토 최적해를 도출할 수 있는 목적함수 가중치를 미리 정할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 유입량의 불확실성 하에서 다수의 파레토 최적해를 도출하게 해주는 목적함수 가중치 셋에 대한 우열을 판정하기 위해 퍼지 자료포락분석(Fuzzy Data Envelopment Analysis, Fuzzy DEA)모형을 활용하였다. 즉, 과거 유입량 자료에서 상, 중, 하 수준에 해당하는 유입량을 각각 적용하여 저수지 군 최적연계 운영모형(Coordinated Multi-reservoir Operating Model, CoMOM)을 수행하여 파레토 최적해 집단을 도출하여 퍼지 집합(fuzzy set)을 구성한 후, Fuzzy DEA를 이용하여 이들 파레토 최적해들에 대한 우열을 가려봄으로써 목적함수 가중치에 대한 적합도를 평가하고 최선의 가중치를 선정하고자 하였다.

본 연구의 이후 구성은 다음과 같다. 먼저, 제 2장에서는 저수지 군 최적 연계 운영 모형과 Fuzzy DEA 등의 이론적 배경을 설명한다. 제 3장에서는 본 연구에서 활용한 모형의 수행절차를 제시하고, 제 4장에서는 금강 수계를 대상으로 한 적용결과를 제시하였다. 그리고 제 5장에서는 결론과 향후 연구 과제를 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 저수지군 최적 연계운영 모형과 목적함수 가중치 설정의 어려움

저수지 군의 최적 연계운영을 위해서 다양한 형태의 확정적 모

형과 추계학적 모형들에 다양한 연구 방법론과 결과들이 Yeh (1985)와 Labadie(2004)에 의해 소개되었다. 그리고 위의 문헌 외에, Eschenbach *et al.*(2001)의 연구를 들 수 있다. 그들은 목표계획법을 적용하여 다양한 현실 제약을 유연하게 반영한 의사결정 지원 시스템을 구축하여 TVA(Tennessee Valley Authority)에 적용한 결과를 제시하고 있다.

본 연구에서는 수력발전보다는 용수공급의 중요성이 더 강조되는 한국적 상황을 고려할 수 있도록 혼합정수계획법(Mixed Integer Programming, MIP)으로 설계된 CoMOM(Coordinated Multi-reservoir Operating Model)(Kim and Park, 1998)을 활용하였다. 이 모형은 저수지, 발전소, 수요지, 조절점 등의 노드(node) 간 물의 물리적인 흐름을 표현한 네트워크 흐름 모형을 근간으로 하여, 기말 목표저수위 준수와 같은 다양한 운영 제약을 목표계획법(Goal Programming)으로 표현하고, 여수로 방류가 발생하는 조건제약을 혼합정수계획법으로 구현한 최적화 모형이다. 아울러 CoMOM은 <표 1>에서 보는 바와 같이 다수의 목적들이 순차적인 우선순위를 갖고 있으며,  $Z_1 \sim Z_{10}$ 까지의 목적을 우선 고려한 후, 수요충족 후 남은 물을 장래 수요에 대비하여 저수할 것인지 아니면 발전 방류할 것인지를 따지는 다중 목적 최적화 문제가 된다(Kim *et al.*, 2005).

표 1. CoMOM 4.0의 목적함수 구조

우선순위	목적	목적 내용
1	$Z_1$	용수부족 최소화
2	$Z_2$	유역 출구에 위치한 최 하단 여수로 방류 최소화
3	$Z_3$	댐 최저운영 수위준수
	$Z_4$	댐 여수로 방류 최소화
	$Z_5$	댐 제한수위 준수
4	$Z_6$	하천 유지용수 준수
5	$Z_7$	조절점 관리유량 준수
6	$Z_8$	기말 목표 저수위 준수
	$Z_9$	목표발전량
7	$Z_{10}$	댐 방류량 변동 폭 최소화
8	$Z_{11}$	저수량 최대화
	$Z_{12}$	발전량 최대화

이 다중목적 최적화 문제를 해결하기 위한 가장 손쉬운 방법으로 저수량과 발전량에 대한 가중치를 조정하면서 문제를 푸는 방법을 생각해 볼 수 있다. 그러나 수시로 변화하는 수문 상황 속에 매 번 저수와 발전 간의 절충 분석을 수행해서 가중치를 결정하는 것은 의사결정자에게 부담을 줄 수 있는 일이다. 이에 본 연구에서는 CoMOM의 목적함수에 적용할 만한 다양한 가중치 집합을 사전에 준비하고 이에 대한 평가 결과를 토대로 적합한 가중치를 선정하고자 하였다.

한편, CoMOM에 적용할 만한 다양한 후보 가중치들을 사전

에 구하기 위해 Lee(2008)에서 제시된 GA-CoMOM(Genetic Algorithm-CoMOM)을 활용하였다. GA-CoMOM은 의사결정자에게 선택의 폭을 넓혀주는 다양한 최적해 집단과 여기에 대응되는 가중치 집단을 도출하는 것을 목적으로 만든 다중목적 유전자 알고리즘 기반의 모형으로서, CoMOM에서 결정하기 어려운 가중치인 ‘저수’와 ‘발전’에 대한 상대적 가중치를 결정 변수로 취한 후, 해당 가중치를 적용하였을 때의 적합도(fitness)를 최적화할 수 있는 NSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II)(Deb, 2001) 모형을 적용하였다. 여기서 적합도의 평가 과정에서는 이상점(ideal point)에 가까운 해를 도출해주는 가중치에 적합도를 크게 부여함으로써 파레토 경계에 가까운 우수한 해 집단을 얻고자 하였으며, 동시에 인접한 해와의 거리가 멀리 떨어진 파레토 최적해에 대한 적합도를 높게 부여함으로써 비교적 다양한(widely distributed) 가중치들이 도출될 수 있도록 하였다(Lee, 2008).

그런데, GA-CoMOM을 통해 도출한 다양한 가중치들에 대한 평가 과정에서 유입량의 변동성은 판단을 더욱 어렵게 한다. 쉬운 예로, 유입량이 적은 경우라면 가급적 발전을 줄이고 장래 용수 수요에 대비해서 저수하는 것이 바람직하고 가중치 역시 저수 목적에 높은 값을 부여하는 것이 바람직하지만, 유입량이 많을 경우는 그 반대 상황이 되는 것에서 문제의 어려움을 알 수 있다. 따라서 불확실한 유입량의 변동성을 감안하여 적절한 가중치를 선정해야 하는데, 본 연구에서는 다음 장에서 설명할 Fuzzy DEA를 활용하고자 한다.

한편, CoMOM을 실제 댐 운영 상황에서 활용하기 위해서는 미래 유입량을 정확히 알 수 없다는 현실을 감안해야 한다. 따라서 본 연구에서는 과거 일별 유입량의 평균값을 CoMOM의 유입량으로 가정하여 매일의 방류량을 도출하였다. 그런데 이 경우 CoMOM을 매일 순차적으로 수행하는 과정에서 다음날의 초기 저수량 계산 시에는 예측 유입량이 아닌 실제 유입량이 반영되어야 한다. 따라서 예측된 유입량을 토대로 정한 최적 방류량은 그대로 사용하고, 실제 유입량을 반영하여 구한 일일의 저수량을 기초로 다시 CoMOM의 최적화를 반복하는 실시간 모의운영 과정을 수행하였다(Na *et al.*, 2010).

## 2.2 Fuzzy DEA

비모수적(non-parametric) 효율성 측정방법인 DEA는 다수 투입물과 다수 산출물과의 비율 관계를 이용하여 상대적 효율성을 계산한다. 그리고 여기에는 명확한(crisp) 입력 데이터와 출력데이터가 요구된다. 그러나 현실세계에서의 데이터는 부정확(imprecise)하거나 불확실한(uncertain)경우가 많다. 이러한 경우에 바람직한 접근 방법으로 Fuzzy DEA를 활용할 수 있다.

Fuzzy DEA는 Sengupta(1992)에 의해 그 틀을 갖춘 모형으로 멤버십(membership)함수를 이용해 애매한 형태의 퍼지 입력과 출력 자료를 활용한다. 이후 많은 적용 모형과 사례가 제시되었으며, Guo and Tanaka(2001)는 DEA CCR(Charnes, Cooper and Rhodes)

모형에 퍼지수와 퍼지등호 및 퍼지 부등호를 적용한 Fuzzy DEA CCR 모형을 제시하고, 더불어 DEA CCR 모형(1978)과 회귀 분석 모형이 목표계획(Goal programming)형태의 모형에서 유도되는 성질을 이용하여 해당 목표계획 모형에 퍼지 개념을 적용한 모형을 제시하였다. 그리고 Saati *et al.*(2002)은 비대칭 삼각형 퍼지함수를 고려한 퍼지 CCR 모형과 그 해법을 제시하였고, Leon *et al.*(2003)도 유사한 개념의 퍼지 BCC(Banker, Charnes and Cooper)모형을 제시했다. 그리고 최근 Wen *et al.*(2010)은 퍼지 사건이 발생할 확률을 의미하는 비선형 함수 형태의 credibility measure의 개념을 적용한 퍼지 DEA 모형을 제시하고, 최적해를 구하기 어려운 비선형 최적화 모형의 특성을 고려하여 유전자 알고리즘을 활용한 해법을 제시하기도 하였다.

본 연구에서는 선형계획 형태의 모형을 통해 최적해를 쉽게 도출할 수 있는 장점을 가진 Wang *et al.*(2009)의 Fuzzy DEA 모형을 활용하여 퍼지효율성을 측정하고 각 DMU(Decision Making Unit)간의 선호도를 가려내고자 하였다. 다음은 그 절차를 요약한 것이다.

통상 일반적인 DEA에서는 입력요소와 출력요소 값을  $x_{ij}$  ( $i = 1, \dots, m$ )와  $y_{rj}$  ( $r = 1, \dots, s$ ), 그리고 각각의 가중치를  $v_i$ 와  $u_r$ 라고 할 때, 의사결정단위  $DMU_j$ 의 효율성을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_j = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \quad (1)$$

그러나 Fuzzy DEA에서는 입출력 요소를  $\tilde{x}_{ij} = (x_{ij}^L, x_{ij}^M, x_{ij}^U)$ 와  $\tilde{y}_{rj} = (y_{rj}^L, y_{rj}^M, y_{rj}^U)$ 와 같은 상, 중, 하 수준의 요소로 구성된 삼각형 퍼지함수의 퍼지수 (fuzzy number)로 나타내며, 이때의 퍼지 효율성은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다. 이 식에서  $\approx$ 는 유사하다는 의미이며, 효율값의 하한값은 효율성 평가식의 분모에 투입변수의 상한값을 적용할 때, 그리고 효율값의 상한은 효율성 평가식의 분모에 투입변수의 하한값을 적용할 때 구할 수 있다는 점을 고려하면 이해될 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_j &= \frac{\sum_{r=1}^s u_r [y_{rj}^L, y_{rj}^M, y_{rj}^U]}{\sum_{i=1}^m v_i [x_{ij}^L, x_{ij}^M, x_{ij}^U]} \\ &= \frac{\left[ \sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^L, \sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^M, \sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^U \right]}{\left[ \sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^L, \sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^M, \sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^U \right]} \\ &\approx \left[ \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^L}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^U}, \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^M}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^M}, \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^U}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^L} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

DMU<sub>j</sub>의 퍼지효율성을 계산하기 위해서 모형 (3)과 같이  $j = 1, \dots, n$ 에 대해  $\tilde{\theta}_j \leq 1$ 로 제한할 수 있다. 나아가  $\theta_j^U$ 가 1보다 작거나 같은 관계가 유지되는 한  $\theta_j^L \leq 1$ 와  $\theta_j^M \leq 1$ 는 자동적으로 만족될 것이므로  $\theta_j^L$ 와  $\theta_j^M$  그리고  $\theta_j^U$ 은 아래의 모형 (4)~모형 (6)에 의해서 구할 수 있다. 나아가 이 모형들은 모형 (7)~모형 (9)과 같은 선형계획 형태로 변환될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \tilde{\theta}_0 \approx [\theta_0^L, \theta_0^M, \theta_0^U] \\ & = \left[ \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}^L}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}^U}, \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}^M}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}^M}, \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}^U}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}^L} \right] \\ \text{s.t. } & \tilde{\theta}_j \approx \left[ \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^L}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^U}, \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^M}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^M}, \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^U}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^L} \right] \leq 1, \\ & j = 1, \dots, n, \\ & u_r, v_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad r = 1, \dots, s. \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \theta_0^L = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}^L}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}^U}, \\ \text{s.t. } & \theta_j^U = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^U}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^L} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n, \\ & u_r, v_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad r = 1, \dots, s. \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \theta_0^M = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}^M}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}^M}, \\ \text{s.t. } & \theta_j^U = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^U}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^L} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n, \\ & u_r, v_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad r = 1, \dots, s. \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \theta_0^U = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}^U}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}^L}, \\ \text{s.t. } & \theta_j^U = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^U}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^L} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n, \\ & u_r, v_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad r = 1, \dots, s. \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \theta_0^L = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0}^L, \\ \text{s.t. } & \sum_{r=1}^s v_i x_{i0}^U = 1, \\ & \sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^U - \sum_{r=1}^s v_i x_{ij}^L \leq 0, \quad j = 1, \dots, n, \\ & u_r, v_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad r = 1, \dots, s. \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \theta_0^M = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0}^M, \\ \text{s.t. } & \sum_{r=1}^s v_i x_{i0}^M = 1, \\ & \sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^U - \sum_{r=1}^s v_i x_{ij}^L \leq 0, \quad j = 1, \dots, n, \\ & u_r, v_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad r = 1, \dots, s. \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \theta_0^U = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0}^U, \\ \text{s.t. } & \sum_{r=1}^s v_i x_{i0}^L = 1, \\ & \sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^U - \sum_{r=1}^s v_i x_{ij}^L \leq 0, \quad j = 1, \dots, n, \\ & u_r, v_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad r = 1, \dots, s. \end{aligned} \tag{9}$$

모형 (7)~모형 (9)를 수행하면 각 DMU(Decision Making Unit) 별 퍼지 효율성을 구할 수 있고, 이를 토대로 다음 절에서 설명할 순위 산정과정을 통해 DMU 간의 비교나 순위선정을 할 수 있다.

### 2.3 퍼지효율성의 순위 산정

퍼지 효율성을 산정하기 위해 삼각형 퍼지 함수 형태의 효율값,  $\tilde{a} = (a_L, a_M, a_U)$ 와  $\tilde{b} = (b_L, b_M, b_U)$ 을 가정한다고 할 때, 2개의 삼각형 중 우위에 있는 부분의 면적,  $S(\tilde{a} > \tilde{b})$ 와  $S(\tilde{b} > \tilde{a})$ 를 기준으로 하는 개념이다. 즉, <그림 1>에서 알 수 있는 바와 같이  $\tilde{a} - \tilde{b}$ 에 대한 퍼지수로서 나올 수 있는 경우는 4가지가 있고, 각 경우에 대한 확률  $P(\tilde{a} > \tilde{b})$ 와  $P(\tilde{b} > \tilde{a})$ 는 식 (10)에 의해 구할 수 있다. 아울러,  $P(\tilde{a} > \tilde{b}) + P(\tilde{b} > \tilde{a}) = 1$ 이 성립하며  $P(\tilde{a} > \tilde{b}) = P(\tilde{b} > \tilde{a})$ 이면  $\tilde{a} = \tilde{b}$ 로 표현될 수 있다. 또  $P(\tilde{a} > \tilde{b}) > P(\tilde{b} > \tilde{a})$ 일 때 즉  $\tilde{a}$ 가  $\tilde{b}$ 보다 크면  $\tilde{a}^{P(\tilde{a} > \tilde{b})} \tilde{b}$ 로 나타내고, 반대로  $P(\tilde{b} > \tilde{a}) > P(\tilde{a} > \tilde{b})$ 일 때 즉  $\tilde{a}$ 가  $\tilde{b}$ 보다 작으면  $\tilde{a}^{P(\tilde{b} > \tilde{a})} \tilde{b}$ 로 나타낸다. 이상의 개념을 바탕으로 퍼지선도도의 순위를 정하기 위해서는 다음과 같은 4단계의 절차가 필요하다.

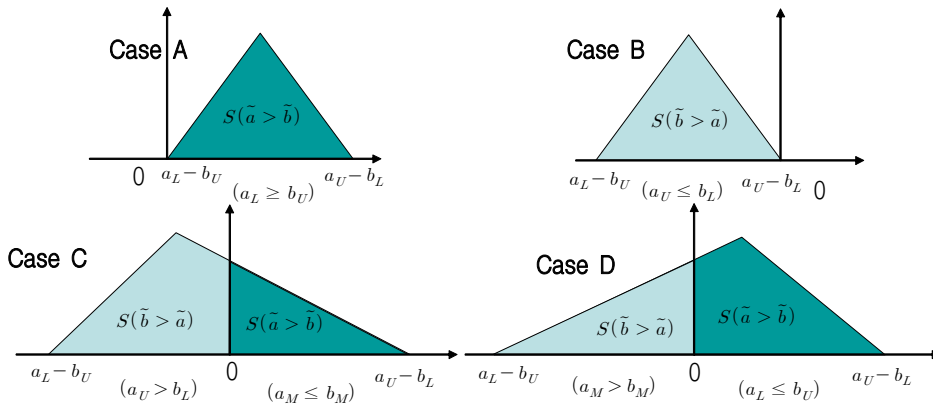


그림 1. 퍼지 효율성의 계산

$$P(\tilde{a} > \tilde{b}) = \begin{cases} 1, & \text{if } a_L \geq b_U \\ 0, & \text{if } a_U \leq b_L \\ \frac{(a_U - b_L)^2}{(a_U - b_L + b_M - a_M)(a_U - a_L + b_U - b_L)}, & \text{if } (a_U > b_L) \cap (a_M \leq b_M) \\ 1 - \frac{(b_U - a_L)^2}{(b_U - a_L + a_M - b_M)(a_U - a_L + b_U - b_L)}, & \text{if } (a_M > b_M) \cap (a_L < b_U) \end{cases} \quad (10)$$

Step 1 : 식 (10)을 이용해서  $P_{ij} = P(\tilde{\theta}_i > \tilde{\theta}_j)$  ( $i, j = 1, \dots, n$ ) 상제는 다음과 같다.  
을 계산하고 행렬 (11)을 구성한다.

$$M_P = \begin{matrix} & \tilde{\theta}_1 & \tilde{\theta}_2 & \dots & \tilde{\theta}_n \\ \tilde{\theta}_1 & - & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ \tilde{\theta}_2 & P_{21} & - & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\theta}_n & P_{n1} & P_{n2} & \dots & - \end{matrix} \quad (11)$$

Step 2 : 선호도행렬의 대각선에 있는 요소를 제외하고 0.5보다 크거나 같은 값들로만 이루어진 i행을 찾는다. 찾아낸 행은 가장 효율성이 큰 행이 된다.

Step 3 : 전 단계에서 구한 i행과 j열을 행렬에서 제거 한다. 축소된 행렬에서 Step 2에서와 같은 방법으로 다음 순서의 효율성을 갖는 행을 찾는다. 이때  $P_{ij} = P_{ji} = 0.5$  이면 i와 j간의 선호도 관계는  $\tilde{\theta}_i \approx \tilde{\theta}_j$ 을 의미하며,  $P_{ij} > 0.5$ 이면  $\tilde{\theta}_i \stackrel{P_{ij}}{>} \tilde{\theta}_j$ 을 의미한다.

Step 4 : 모든 DMU에 대한 순위가 결정될 때까지 이상의 절차를 반복하면, 전체 DMU에 대한 순서가 결정된다.

### 3. 목적함수 가중치에 대한 우선순위 평가를 위한 Fuzzy DEA의 적용 절차

본 연구에서 제시하는 절차는 4단계로 진행되며 각 단계별

#### Step 1 : 평가 대상 후보 가중치의 선정

GA-CoMOM을 활용하여 m개의 다양한 파레토 최적해들을 찾고, 여기에 대응되는 가중치 집단을 도출한다. 이때 도출된 가중치 집합들은 Fuzzy DEA의 평가를 위한 DMU가 된다.

#### Step 2 : 후보 가중치와 퍼지 유입량 자료를 적용한 댐 균 실시 간 최적 연계운행 을 수행

Step 1에서 선정된 DMU(가중치집합)가 유입량의 불확실성 하에서 적합한지 여부를 평가하기 앞서, 전 단계에서 구한 m개의 후보 가중치들과 몇 개(n)의 유입량 패턴을 적용하여 저수지 균 실시간 최적 연계운행을 수행한다. 여기서 유입량 패턴은 과거 유입량에서 상, 중, 하 수준에 해당하는 3개를 고려하였다. 이때는 실제 저수지 균을 운영할 수 없기 때문에 제 2.1절에서 설명한 실시간 모의운행을 실시한다. 그 결과 “m×n(= 3)”만큼의 수행 결과를 얻을 수 있다. 이상의 과정을 통해 삼각형 퍼지 퍼지함수를 구성하는 n(= 3)개의 퍼지 원소로 이뤄진 m개의 대안을 도출할 수 있다.

#### Step 3 : Fuzzy DEA를 적용하여 가중치의 효율성 평가

Fuzzy DEA를 적용하기 위해서는 투입요소와 산출요소를 선정해야 한다. 본 연구에서는 계획한 기말 목표 저수량을 준수 하는 것이 바람직한 점을 고려하여 댐 별 ‘목표 저수량과 저수

량과의 오차'를 입력요소로 하였으며, 가급적 늘리는 것이 바람직한 '발전량'을 산출요소로 설정하였다. 이상의 입출력 요소를 토대로 Step 2에서 구한 m개의 저수지 운영 가중치 대안에 대해 모형 (7)~모형 (9)를 이용한 Fuzzy DEA를 수행한다.

Step 4: 선호도 접근법을 통해 퍼지효율성을 비교 후 순위결정

Step 3에서 도출된 Fuzzy DEA의 결과에 제 2.3절에서 설명한 순위 산정법을 적용하여 m개의 DMU(가중치)에 대한 순위를 결정한다. 즉, 불확실한 유입량 조건 하에서 가장 적합한 가중치를 파악한다.

4. 사례 적용 및 결과 분석

본 연구에서는 앞서 제시된 Fuzzy DEA 기반의 순위 산정 절차를 통해 금강 수계 저수지군 연계운영을 위한 최적화 모형에 적합한 가중치를 선정하고자 하였다. <그림 2>은 금강 수계의 네트워크 흐름을 도시화한 것으로, 금강 수계에는 용담댐과 대청댐을 중심으로 해서용담댐에서는 전주권에 용수를 공급하고 두 곳의 발전시설을 운영하고 있으며, 대청댐에서는 대전, 청주, 공주 권역에 용수를 공급하고 한 곳의 발전 시설을 운영하고 있다. 분석대상은 이수가 시작되는 10월로 설정하여 이 달에 적합한 가중치를 선정하고자 하였다. 이는 저수지군 최적 연계운영 모형에 대한 적절한 가중치가 매 월별로 다를 수 있음을 고려한 것으로, 이 때문에 1년 전체를 한 번에 분석하는 대신 1개월에 대한 분석을 수행하고 Fuzzy DEA의 가능성을 확인하고자 하였다.

4.1 평가 대상 DMU 선정

평가 대상 DMU, 즉 가중치 집단을 도출하기 위해 GA-CoMOM을 활용하였다. 이때 GA-CoMOM의 결정변수로는 저수와 발전에 대한 가중치만을 고려해도 무방하다. 그 이유는 <표 1>에서 보는 바와 같이  $Z_1-Z_{10}$ 의 목적에 대한 우선순위가 저수( $Z_{11}$ )와 발전( $Z_{12}$ )에 대한 우선순위보다 앞서고, 이에 따라  $Z_1-Z_{10}$ 의 가중치는 선취적(preemptive) 우선순위가 반영되도록 미리 할당할 수 있기 때문이다. 한편, 저수와 발전 가중치에 대한 조정시에도 두 가중치에 대한 상대적인 크기만 중하므로 발전 가중치를 1로 고정된 후, 저수가중치만 조정하는 방법을 적용하였다. 따라서 결과적으로 GA-CoMOM에서는 용담댐과 대청댐

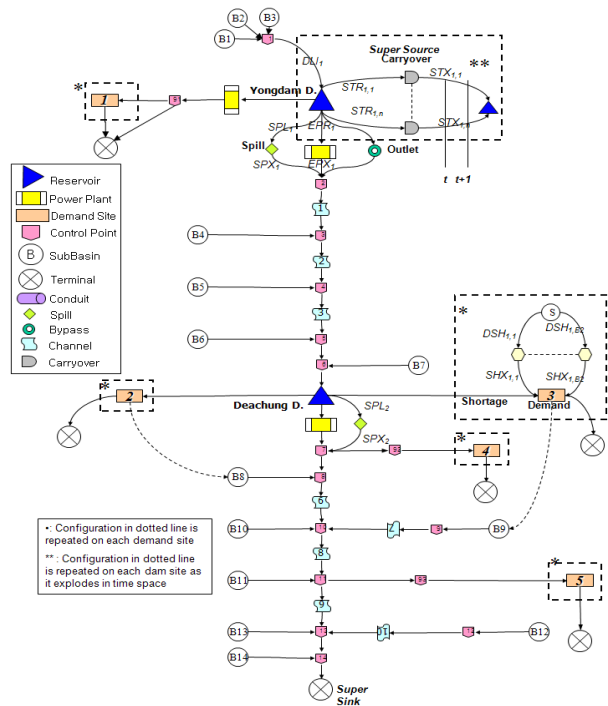


그림 2. 금강 수계의 네트워크 구조

에 대한 저수 가중치를 결정 변수로 하는 GA-CoMOM을 수행하여 다양한 파레토 최적해들을 도출하고자 하였다. 그리고 이 과정을 통해 10개의 파레토 최적 가중치를 도출하여 <표 2>에 제시하였다. <표 2>에 제시된 10개의 DMU가 Fuzzy DEA를 통한 평가 대상이 된다.

4.2 저수지 군 최적 연계운영 수행

이 단계에서는 앞서 선정된 10개의 저수 가중치 셋을 적용하여 저수지 군 연계운영을 수행하고 그 결과를 도출한다. 이 과정에서 유입량의 변동성을 감안하기 위해 금강수계의 최근 7개년(2003년~2009년)간 10월 유입량 자료 중 하위 25%, 평균, 상위 75%의 값을 고려하였다. 결과적으로 10개의 가중치 셋을 적용하여 3회씩 CoMOM을 수행하며 여기서 도출된 '목표저수량과의 오차'와 '발전량'이 Fuzzy DEA를 위한 평가 자료가 된다.

한편, 본 연구에서는 다양한 초기 저수량 조건에 대한 적절한 가중치 선정을 목적으로 2003년~2009년의 7개년의 9월 30일의 저수량 중 최소, 평균, 최대치를 추가적으로 고려하였다. 즉, 3개의 초기 저수위 조건별로 각각 30회(= DMU 개수(10개) × 유입량(3개))의 CoMOM을 실시간 모의 운영하였다. 그 결과

표 2. 저수 목적에 대한 가중치\*

	DMU A	DMU B	DMU C	DMU D	DMU E	DMU F	DMU G	DMU H	DMU I	DMU J
용담댐	$5 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^4$	$3 \times 10^2$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^2$	$1.4 \times 10^1$	$9 \times 10^3$	$1.4 \times 10^1$
대청댐	$6 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^1$	$5 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^0$	$8 \times 10^0$	$1 \times 10^1$	$2 \times 10^1$	$1.5 \times 10^0$	$5 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^4$

주) \* 발전가중치를 1로 고정된 경우.

<표 3>의 결과를 얻을 수 있었다.

값에 해당한다.

4.3 Fuzzy DEA 효율성 평가

이 단계에서는 용담댐과 대청댐의 기말 목표 저수량과 실제 기말 저수량과 오차를 Fuzzy DEA의 투입요소로, 월간 총발전량을 산출요소로 한 Fuzzy DEA를 수행한다. <표 3>의 입출력 요소를 대상으로 하여 모형 (7)~모형 (9)를 적용하여 퍼지 효율성을 산정하였으며, <표 4>는 그 결과를 정리한 것이다. 이때, 식에 사용된  $x^L, x^M, x^U$ 는 유입량의 하위, 평균, 상위 수준의 값을 적용한 경우에 댐 군 실시간 연계운영 모형을 통해 얻은 용담댐과 대청댐의 저수량과 기말 목표 저수량과의 차이를 의미하며,  $y^U$ 는 상위 수준의 유입량을 적용한 경우의 총 발전량

4.4 DMU 간 퍼지효율성의 비교 및 순위결정

이 단계에서는 <표 4>의 퍼지효율성을 토대로 DMU 간 우열 관계를 평가하고 순위를 산정한다. 이를 위해 우선 <표 5>와 같은 선호도 행렬(matrix),  $M_p$ 를 행렬식 (11)을 이용하여 도출하였다. 이 과정을 확인해 보기 위해 <표 5>의 저(低)수위 적용한 경우  $P_{AD}$ 의 값, 0.7921이 나온 경우를 자세히 살펴보면, <표 4>에서 초기저수위가 낮은 상황에서 DMU A의 퍼지효율성의 하한, 중간, 상한은 0.8240, 0.8887, 1이고, DMU D의 경우는 0.7193, 0.8358, 0.9440로 나타났다. 이 수치들은 멤버십 함수를 정의하는 식 (10)의 4가지 케이스 중  $(a_M > b_M) \cap (a_L < b_U)$

표 3. Fuzzy DEA의 입출력 요소

초기 저수위	낮음			중간			높음		
	목표 저수량과 오차 (대청댐) ( $10^6 m^3$ )	목표 저수량과 오차 (용담댐) ( $10^6 m^3$ )	발전량 (GWh)	목표 저수량과 오차 (대청댐) ( $10^6 m^3$ )	목표 저수량과 오차 (용담댐) ( $10^6 m^3$ )	발전량 (GWh)	목표 저수량과 오차 (대청댐) ( $10^6 m^3$ )	목표 저수량과 오차 (용담댐) ( $10^6 m^3$ )	발전량 (GWh)
A	262.18	5.13	67.39	263.38	6.96	68.60	263.38	8.56	71.08
B	124.87	50.95	15.96	129.33	52.78	16.02	141.78	54.38	16.15
C	271.04	26.89	54.04	281.94	28.63	55.01	285.13	30.32	56.74
D	219.97	41.23	51.28	268.50	43.06	51.48	273.19	44.66	51.87
E	221.88	41.23	38.97	238.79	43.06	39.09	248.57	44.66	39.36
F	177.13	41.23	34.64	194.03	43.06	34.75	203.81	44.66	34.96
G	102.49	50.95	13.70	106.96	52.78	13.75	119.40	54.38	13.85
H	268.33	17.29	56.20	285.13	26.25	56.64	285.13	26.41	57.01
I	169.63	50.95	20.41	174.09	52.78	20.50	186.53	54.38	20.67
J	20.48	41.23	18.72	37.39	43.06	18.73	46.49	44.66	18.77

표 4. 퍼지 효율성 평가 결과

초기 저수위 (DMUs)	낮음			중간			높음		
	하한	중간	상한	하한	중간	상한	하한	중간	상한
A	0.8240	0.8887	1	0.9294	0.9529	1	0.4206	0.4702	0.9565
B	0.1997	0.2566	0.3002	0.2894	0.3121	0.3259	0.0450	0.0456	0.0578
C	0.3594	0.3936	0.5009	0.6334	0.6555	0.7051	0.2244	0.2388	0.2569
D	0.7193	0.8358	0.9440	0.5908	0.6054	0.7245	0.3178	0.4118	1
E	0.6178	0.6402	0.6993	0.4855	0.5066	0.5459	0.2337	0.3007	0.7508
F	0.6338	0.6597	0.7301	0.5063	0.5320	0.5803	0.2180	0.2849	0.7324
G	0.2050	0.2359	0.2790	0.2783	0.3028	0.3174	0.0466	0.0472	0.0633
H	0.3990	0.4911	0.5839	0.6687	0.6743	0.7438	0.2431	0.2600	0.2811
I	0.2114	0.2894	0.3327	0.3047	0.3245	0.3366	0.0430	0.0506	0.0565
J	0.7706	0.8732	1	0.6994	0.7857	1	0.1813	0.2735	1

표 5. 선호도 행렬

저(低)수위 적용 시										
DMU	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	-	1	1	0.7921	1	1	1	1	1	0.6008
B	0	-	0	0	0	0	0.6396	0	0.2924	0
C	0	1	-	0	0	0	1	0.1596	1	0
D	0.2079	1	1	-	1	0.9980	1	1	1	0.3141
E	0	1	1	0	-	0.2839	1	1	1	0
F	0	1	1	0.0020	0.7161	-	1	1	1	0
G	0	0.3604	0	0	0	0	-	0	0.1932	0
H	0	1	0.8404	0	0	0	1	-	1	0
I	0	0.7076	0	0	0	0	0.8068	0	-	0
J	0.3992	1	1	0.6859	1	1	1	1	1	-

중(中)수위 적용 시										
DMU	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	-	1	1	1	1	1	1	1	1	0.9436
B	0	-	0	0.0000	0	0	0.7215	0	0.1961	0
C	0	1	-	0.7138	1	1	1	0.1636	1	0.0007
D	0	1	0.2862	-	1	1	1	0.1197	1	0.0071
E	0	1	0	0	-	0.1796	1	0	1	0
F	0	1	0	0	0.8204	-	1	0	1	0
G	0	0.2785	0	0	0	0	-	0	0.0668	0
H	0	1	0.8364	0.8803	1	1	1	-	1	0.0338
I	0	0.8039	0	0	0	0	0.9332	0	-	0
J	0.0564	1	0.9993	0.9929	1	1	1	0.9662	1	-

고(高)수위 적용 시										
DMU	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	-	1	1	0.5679	0.7928	0.8138	1	1	1	0.6807
B	0	-	0	0	0	0	0.3324	0	0.4195	0
C	0	1	-	0	0.0115	0.0325	1	0.0770	1	0.0608
D	0.4321	1	1	-	0.7127	0.7348	1	1	1	0.6221
E	0.2072	1	0.9885	0.2873	-	0.5314	1	0.9540	1	0.4460
F	0.1862	1	0.9675	0.2652	0.4686	-	1	0.9181	1	0.4218
G	0	0.6676	0	0	0	0	-	0	0.5748	0
H	0	1	0.9230	0	0.0460	0.0819	1	-	1	0.1025
I	0	0.5805	0	0	0	0	0.4252	0	-	0
J	0.3193	1	0.9392	0.3779	0.5540	0.5782	1	0.8975	1	-

에 해당되므로  $1 - \frac{(b_U - a_L)^2}{(b_U - a_L + a_M - b_M)(a_U - a_L + b_U - b_L)}$ 에 대입하여 풀면 퍼지 효율성 평가 결과, 0.7921이 도출되는 것을 알 수 있다.

이 같은 방식으로 얻은 선호도 행렬로부터 제 2.3절에서 설명한 순위산정 절차를 통해 모든 DMU에 대한 우열 순서를 산정한다.

<표 6>은 그 결과로서 3가지의 초기 저수위 조건별로 DMU의 우열 관계를 정리한 것이다. 초기 저수위가 낮은 경우의 결과에  $A \overset{94.36\%}{>} J$ 가 있는데, 이는 제 2.3절에서 언급했듯이  $\tilde{A} - \tilde{J}$  결과 값 중 삼각형 퍼지수가 0보다 큰 값을 갖는 면적의 비율이 94.36%이며, 따라서 DMU A가 DMU J에 비해 더 나은 선호도를 갖는다는 뜻이다. 그리고 DMU J, D, F가 그 뒤를 이었다. 한편, 초기 저수위가 다를 경우에도 DMU A에 대한 우위는 확인



표 6. 선호도 순위 산정 결과

		초기 저수위	The Degrees of Preference
Fuzzy DEA	낮음		60.08% 68.59% 99.80% 71.61% 100% 84.04% 100% 70.76% 63.96% $A > J > D > F > E > H > C > I > B > G$
	중간		94.36% 96.62% 83.64% 71.38% 100% 82.04% 100% 80.39% 72.15% $A > J > H > C > D > F > E > I > B > G$
	높음		56.79% 62.21% 55.40% 53.14% 91.81% 92.30% 100% 57.48% 58.05% $A > D > J > E > F > H > C > G > I > B$
DEA CCR	낮음		$A = J > H > D > C > F > E > I > B > G$
	중간		$A = J > H > C > D > F > E > I > B > G$
	높음		$A = J > H > C > D > F > E > I > B > G$

할 수 있었다. 그러나 그 뒤를 잇는 DMU의 순위에서는 다소 다른 결과가 나타났다. 가령, 초기 저수위가 높을 경우는 DMU D와 DMU J의 순서가 바뀌었는데, 이것은 이미 초기 저수량이 충분히 확보되었을 경우 저수에 대한 가중치가 매우 높은 DMU J보다 그렇지 않은 DMU D가 보다 더 적합하기 때문으로 해석된다. 이러한 차이는 가중치에 대한 선호도가 초기 저수위 상태에 따라 결정될 수 있음을 보여주는 것으로, 저수지군 최적 연계운영 모형(CoMOM)을 위한 가중치는 초기 저수량 조건을 고려해야 한다는 것을 의미한다.

한편, <표 6>에서는 Fuzzy DEA의 적용 결과를 일반적인 DEA CCR 모형(Charnes, 1978)의 결과와 비교해 보았다. DEA CCR 모형은 Fuzzy DEA에서 사용한 입력요소, 출력요소의 중간 값을 이용하여 효율성을 평가한 것으로 DMU A와 DMU J의 효율성이 1로서 같은 것으로 나타났다. 즉, 일반적인 DEA의 특성상 입력자료의 변동성을 고려하지 못하고 다수의 DMU를 ‘효율적’으로 판정한 것이다. 이상을 통해 유입량의 변동성을 감안하여 보다 명확한 평가를 위해 Fuzzy DEA가 유용하게 활용될 수 있음을 확인할 수 있다.

표 7. 퍼지 지수 산정 결과

초기 저수위	낮음	중간	높음
A	0.1760	0.0706	0.5359
B	0.1005	0.0365	0.0128
C	0.1415	0.0717	0.0324
D	0.2247	0.1337	0.6822
E	0.0815	0.0605	0.5171
F	0.0963	0.0740	0.5144
G	0.0740	0.0391	0.0168
H	0.1848	0.0751	0.0380
I	0.1214	0.0319	0.0134
J	0.2294	0.3006	0.8187
평균	0.1430	0.0894	0.3182

끝으로, <표 7>은 퍼지 효율성의 편차를 정리한 것이다. 가령, 초기 저수위가 낮은 상태에서 DMU A의 퍼지 지수는 0.1760

인데, 이는 <표 4>의 같은 조건에서 DMU A의 효율이 최저 0.824, 최대 1.000의 값을 가진 데서 계산된 것이다. 전체적으로 초기 저수위가 높을 때 퍼지 지수가 큰 것으로 나타났는데, 이는 초기 저수위가 높을 경우 유입량의 많고 적음에 따라 가중치의 적합도가 크게 달라질 수 있음을 의미한다. 그리고 이 결과는 초기 저수량이 적은 조건에서 유입량의 많고 적음에 큰 관계없이 가급적 저수를 하는 것이 바람직한 것과 달리, 초기 저수량이 많은 조건에서는 유입량이 적을 때는 저수가 바람직하고, 반대로 유입량이 많을 때는 저수하는 것이 바람직하지 않은 현실을 감안할 때 타당하다고 판단된다.

### 5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 저수지 군 연계운영 문제에서 도출된 다수의 파레토 최적해에 대한 우열관계를 파악하고, 가장 우수한 파레토 최적해에 대응되는 목적함수 가중치를 제시할 수 있는 Fuzzy DEA의 적용 사례를 제시하였다. 그 결과 10개의 후보 가중치들에 대한 효율성을 구하고 선호도 행렬을 통해 각 가중치들 간의 순위를 정할 수 있었다. 또한, DEA CCR 모형이 가장 우수한 두 개의 가중치(DMU)에 대한 우열을 가리지 못해 의사결정자로 하여금 가장 우수한 가중치를 선정하는 데 어려움을 준 것과 달리, Fuzzy DEA는 모든 DMU에 대한 우열을 가려 낼 수 있음을 가릴 수 있음을 알 수 있었다. 이는 CCR 모형과 달리 Fuzzy DEA 모형은 입력값의 변동에 따라 효율성 값이 가질 수 있는 상, 중, 하 수준의 수치를 계산한 후, 이 값을 토대로 확률적 개념 하에서 식 (10)에 의거한 퍼지 효율성을 산출함으로써 CCR 모형에 비해서 효율성의 정도를 좀 더 세분화시켜 나타낼 수 있기 때문에 적어도 Fuzzy DEA 모형의 경우 CCR 모형이 효율적이라고 판단하는 확실적인 구분을 완회시키는 효과가 있다는 것을 의미한다.

한편, 본 연구에서 다룬 금강 수계는 댐의 수가 2개에 불과해서 두 댐의 목표 저수량과의 차이를 DEA 모형의 입력요소로 처리해도 무방하나, 댐의 수가 크게 증가할 경우 입력요소의 수가 지나치게 많아지는 문제가 발생할 수 있다. 가령, 소양강 및 충주댐을 비롯한 10개의 댐이 운영되는 한강수계를 예로 들

면, 입력요소의 수가 모두 10개가 되고 출력요소까지 합해 총 11개의 평가 요소가 고려된다. 하지만 입출력 요소가 증가하게 되면 자유도(degree of freedom)가 줄어들게 되어 효율적 DMU와 비효율적 DMU와의 구분이 어렵게 되는 경향이 있다. 이에 Cooper가 제시한 Rule of thumb에 의하면  $n(\text{DMU의 수}) \geq \max\{m(\text{입력요소}) \times s(\text{출력요소}), 3 \times (m(\text{입력요소}) + s(\text{출력요소}))\}$  이므로 비교할 대상 DMU 개수도 증가시켜야하는 경향이 있다(Cooper *et al.*, 2007). 즉, 적어도 33개( $\max\{입력요소(10) \times 출력요소(1), 3 \times (입력요소(10) + 출력요소(1))\}$ )의 DMU가 필요하게 되는데, 그것은 그 만큼 많은 수의 가중치 집합을 생성하고 그 만큼의 최적화 수행을 해야 한다는 부담이 있다. 따라서 이 문제를 고려한 향후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- Charnes, A., Cooper, W. W., and Rhodes, E. (1978), Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, 2, 429-444.
- Guo, P. and Tanaka, H. (2001), Fuzzy DEA : perceptual evaluation method, *Fuzzy Sets and Systems*, 119, 149-160.
- Deb, K. (2001), Multi-objective optimization using evolutionary algorithms, John Wiley and Sons, Chichester.
- Eschenbach, E. A., Magee, T., Zagana, E., Goranflo, M., and Shane, R. (2001), Goal Programming Decision Support System for Multiobjective Operation of Reservoir Systems, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(2), 108-120.
- Kim, M. G., Kim, J. H., and Kim, S. K. (2008), Determination of weight coefficients of multiple objective reservoir operation problem considering inflow variation, *Journal of the Korea Water Resources Association*, 41(1), 1-15.
- Kim, S. K. and Park, Y. J. (1998), A Mathematical Model for Coordinated Multiple Reservoir Operation, *Journal of the Korea Water Resources Association*, 31(6), 779-793.
- 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*, 5(3-4), 81-88.
- Kim, J. H. and Kim, S. K. (2006), A CHIM based interactive tchebycheff procedure for multiple objective decision making, *Computers and Operations Research*, 33(6), 1557-1574.
- Labadie, J. W. (2004), Optimal operation of multireservoir systems : state-of-art review, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), 93-111.
- Lee, Y. D. (2008), Stochastic Linear Programming Models for Coordinated Multi-Reservoir Operation, Ph. D. Dissertation, *Korea University*.
- Leon, T., Liern, V., Ruiz, J. L., and Sirvent, I. (2003), A fuzzy mathematical programming approach to the assessment of efficiency with DEA models, *Fuzzy Sets and Systems*, 139(2), 407-419.
- Na, M. S., Kim J. H., and Kim S. K. (2010), Development of Operating Guidelines of a Multi-reservoir System Using an Artificial Neural Network Model, *IE Interfaces*, 23(4), 310-317.
- Saati, S., Menariani, A., and Jahanshahloo, G. R. (2002), Efficiency analysis and ranking of DMUs with fuzzy data, *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 1(3), 255-267.
- Sengupta, J. K. (1992), A fuzzy systems approach in data envelopment analysis, *Computers and Mathematics with Applications*, 24(8-9), 259-266.
- Yeh, W. W.-G. (1985), Reservoir management and operations models : A state of art review, *Water Resources Research*, 21(12), 1797-1818.
- Wang Y. M., Luo Y., and Liang L. (2009), Fuzzy data envelopment analysis based upon fuzzy arithmetic with an application to performance assessment of manufacturing enterprises, *Expert systems with applications*, 36, 5205-5211.
- Wen, M., You, C., and Kang, R. (2010), A new ranking method to fuzzy data envelopment analysis, *Computers and Mathematics with Applications*, 59, 3398-3404.
- William, W. C., Lawrence, M. S., and Kaoru, T. (2007), *Data Envelopment Analysis : A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*, Second Edition, Springer, New York.



**김 용 기**

연세대학교 정보통신학과 학사  
현재 : 고려대학교 정보경영공학전문대학원 석사과정  
관심분야 : 대기준 의사결정, 시스템 분석  
기술경영



**김 재 희**

고려대학교 산업공학과 학사  
고려대학교 산업공학과 석사  
고려대학교 산업공학과 박사  
현재 : 전북대학교 경영학부 부교수  
관심분야 : 대기준 의사결정, 수자원/교통/  
생산 시스템 분석



**김 승 권**

서울대학교 기계공학과 학사  
Stanford University 산업공학과 석사  
UCLA 시스템공학과 박사  
HARZA Engineering Co., Chicago, USA. System Analyst  
현재 : 고려대학교 기술경영전문대학원 교수  
관심분야 : 대기준 의사결정 분석, 기술 경영,  
SCM, 수자원/환경 및 에너지  
시스템 분석