

DEA기반 순위결정 절차를 활용한 저수지군 연계운영

Coordinated Multiple Reservoir Operation Using a DEA-based Ranking Procedure

전승목*, 김승권**

Seung-Mok Jeon, Sheung-Kwon Kim

요 지

저수지군 연계운영 문제는 서로 상충되는 목적들이 존재하고, 다양한 평가 기준들이 존재하는 다목적 특성을 갖는 문제이다. 때문에 저수지군 연계운영 문제에 다중목적계획법이 많이 사용되고 있으나 문제의 해결을 위해 사용한 다수의 목적간의 가중치 설정에 의사결정자의 주관적요소가 반영 될 수도 있고, 설정된 가중치에 따라 결과 값이 민감하게 반응하여 의사결정자가 바람직한 가중치 설정에 어려움이 있다.

본 연구의 목적은 다중 목적 특성이 존재하는 저수지군 연계운영 문제에 다요소 의사결정기법 적용하여 바람직한 저수지별 저수 가중치를 선정하는 방법을 제안하는 것이다. 제안하는 저수 가중치 선정 절차는, 우선 GA-CoMOM (Genetic-Algorithm Coordinate Multi-reservoir Operation Model)을 통해 수계 전체 관점에서 저수량과 발전량의 상충되는 목적에 대한 파레토 최적해와 각 최적해에 해당하는 저수지별 저수 가중치를 도출한다. 다음 단계로 다요소 의사결정기법중에 하나인 수정된 거리척도 기반의 DEA 순위 선정 절차를 이용하여 도출된 최적해들의 운영 결과를 평가하여 파레토 최적해군 중에 선호해를 결정하고, 결정된 선호해의 저수지별 저수 가중치를 해당 기간의 저수 가중치로 선정한다. 설명한 선호 가중치 선정 절차를 금강 수계에 적용해 보고 저수지 연계운영에서 바람직한 가중치를 도출할 수 있음을 보인다.

핵심용어: Ranking, DEA, 저수지군 연계운영, 다중 목적 계획법

1. 서 론

저수지군 연계 운영은 저수량 최대화, 발전량 최대화등 다양한 목적들이 상충되는 특성이 있으며, 다수의 운영상의 기준이 존재하는 다기준 의사결정 문제이다. 그러므로 수계 전체 관점에서 저수량 최대화와 발전량 최대화등 다양한 목적과 다수의 운영상의 기준을 고려한 객관적이고 합리적인 가중치 설정이 중요하다. 본 연구에서는 Lee et al.(2007)가 제안한 GA-CoMOM을 이용하여 저수지군 연계 운영문제에 바람직한 가중치 선정 방법을 연구하였다. GA-CoMOM은 GA(Genetic Algorithm)을 이용하여 수계 전체 관점에서 저수 가중치만을 조정하여 저수량과 발전 방류량의 상충되는 목적을 고려한 다수의 대안들을 제시하는 방법이다. GA-CoMOM에서 도출된 결과는 두 가지 목적에 대한 운영상 좋은 결과를 나타내는 대안들이지만, 대안마다 운영상의 형태와 결과가 다르므로 대안 도출시 고려하지 못한 다른 기준들도 고려하여 최선의 대안을 선택하여 이용하는 것이 바람직하다.

제시된 대안들을 다수의 다른 기준으로 평가하기위해, 기준간의 관계가 명확하지 않는 의사결정에서도 다수의 기준을 고려하여 평가 할 수 있는 DEA(Data Envelopment Analysis)를 사용하였다. 그러나 일반적인 DEA의 평가 결과에서는 다수의 우수한 대안이 나타 날 수 있고, 우수한 대안들의 우열을 판정하기 애매하다는 단점이 있다. 본 연구에서는 DEA 기법을 장점을 살리고 대안들 간의 순위 정보를 제공 할 수 있는 DEA 기반의 순위결정 절차를 이용하여 대안들을 평가하고, 가장 우수한 대안으로 결정된 대안의 가중치를 운영상의 가중치로 선정하는 방법을 제안하였다. 또한 제안된 방법을 이용하여 실제 금강 수계 선호 가중치를 선정하는 문제에 적용하여 보았다.

* 정회원·고려대학교 정보경영공학전문대학원 석사과정 E-mail: wizardmogy@syslab.korea.ac.kr

** 정회원·고려대학교 정보경영공학부 교수 E-mail: kimsk@korea.ac.kr

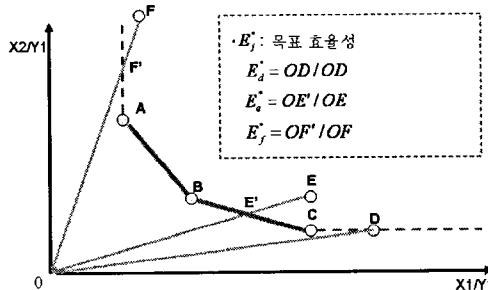
2. DEA기반 순위결정 절차의 이론적 배경

2.1 거리척도 기반의 DEA 순위결정 기법

Kao and Hung (2005)과 Cook and Zhu (2007)은 기존의 DEA모형을 기반한 순위결정 모형을 제시하였다. 이 모형은 각 DMU(Decision Making Unit)의 목표 효율성(E_j^*)을 도출한 후, Yu(1973)가 제시한 그룹의사결정 기법을 이용하여 각 DMU의 효율성과 목표 효율성간의 오차를 최소화하는 가중치(u, v)를 선정한다. 여기서 각 DMU의 목표 효율성(E_j^*)은 모형의 주요 매개변수로서 각 DMU가 가질 수 있는 최대 효율성 수치인 DEA-CCR 효율성 점수로 설정한다. 본 연구에서는 DMU간 순위결정을 위해 Tchebycheff 거리를 사용하고 Cook and Zhu (2007)가 제안한 거리척도 기반의 순위결정 모형(1)을 근간으로 하였다.

$$\begin{aligned} \min d \\ d \geq E_j^* \cdot vX_j - uY_j & \quad j \in J \\ uY_j - vX_j \leq 0 & \quad j \in J \\ u \geq \varepsilon, v \geq \varepsilon, d \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

모형(1)의 목적은 첫 번째 제약식을 주요 제약으로 해서, 목표 효율성 달성을 가장 열등한, 다시 말해 투입($E_j^* \cdot vX$) 대비 산출(uY)이 크지 않은 DMU에 대해 오차(d)를 최소화하는 가중치 (u^*, v^*)를 결정하는 것이다. 그리고 여기서 도출된 공통 가중치(u^*, v^*)는 전체 DMU를 고려하여 도출된 가중치로서 이 가중치를 사용하여 전체 DMU의 순위를 결정할 수 있다.



<그림 1> DMU별 목표 효율성 계산 예시 (E_j^*)

한편 모형(1)에서 사용되는 목표 효율성은 각 DMU가 갖는 이상적인 목표의 성격을 가지기 때문에 효율성 평가에 있어 매우 중요한 매개변수에 해당된다. 그러나 기존의 모형에서는 DEA모형 통해 E_j^* 를 설정하는 과정에서 복합 비효율성(mix inefficiency)의 존재 가능성을 간과하고 있다. <그림 1>을 보면 DMU(D)와 DMU(F)가 복합 비효율성이 존재함을 알 수 있다. 우선 DMU(D)는 잔여요소(slack)가 존재하는 비효율적 상태의 DMU(mix inefficiency)라는 것을 알 수 있다. 그러나 DMU(D)는 복합 비효율성 상태임에도 불구하고 그 목표 효율성(E_d^*)이 1로 계산된다. 또한 DMU(F)는 비효율적이면서 약한 효율적 프런티어(weakly efficient frontier)를 기준으로 평가 받는 비효율적 DMU라는 것을 알 수 있다. 그러나 DMU(F)는 목표 효율성(E_f^*)을 계산함에 있어 약한 효율적 프런티어상에 있는 F'를 기준으로 평가하는 오류가 발생한다. 그래서 본 연구에서는 Cook and Zhu(2007)와 Kao and Hung(2005)의 순위결정기법에서 나타나는 복합 비효율성의 문제를 해결하기 위해 전승목 외(2007)가 제안한 DEA 순위결정 절차를 이용하였다.

2.2 DEA기반의 순위결정 절차

본 연구에서 사용하는 DEA 순위결정 절차(전승목 외, 2007)는 기존의 거리척도 기반의 DEA 순위결정 모형의 복합 비효율성 문제에서 야기된 목표 효율성의 문제점을 FDEF(Full Dimensional Efficient Facet) 정의를 이용한 Olesen and Petersen 모형(Olesen and Petersen, 1996)과 Assurance Region-Extended Facet 모형(Portela and Thanassoulis, 2006)을 이용하여 해결한 방법이다. <표 1>는 수정된 거리척도 기반의 DEA 순위결정 절차에 대한 각 단계별 모형과

각 단계의 목적과 산출물을 중심으로 전체 절차를 요약한 것이다. 자세한 각 단계별 모형의 설명과 관계는 전승목 외 (2007)에서 확인 할 수 있다. 간단하게 DEA 순위결정 절차를 설명하면, Step 1~3은 기존의 거리척도 기반의 DEA 순위결정모형에서 복합 비효율성을 제거하기 위한 절차이고 Step 4는 Step 1~3의 수행 결과를 반영하기위한 수정한 거리척도 기반 DEA 순위 결정 모형(2)이다. 결과적으로 Step 1~4의 절차를 통해 복합 비효율성을 제거한 목표 효율성을 이용하여, DMU를 재평가하기 위한 공통 가중치(u^{4*}, v^{4*})를 도출한다.

$$\begin{aligned} & \min d && (a) \\ & \text{Subject to} \\ & E_j^{2*} \cdot v^4 X_j - u^4 Y_j \leq d && (b) \\ & u^4 Y_j - v^4 X_j \leq 0 && (c) \\ & \min \frac{u_r^{2*}}{v_l^{2*}} \leq \frac{u_r^4}{v_l^4} \leq \max \frac{u_r^{2*}}{v_l^{2*}} && (d) \quad (2) \\ & \min \frac{v_l^{2*}}{v_l^{2*}} \leq \frac{v_l^4}{v_l^4} \leq \max \frac{v_l^{2*}}{v_l^{2*}} && (e) \\ & \sum u^4 \geq \varepsilon, \sum v^4 \geq \varepsilon && (f) \\ & u^4 \geq 0, v^4 \geq 0, d \geq 0 \end{aligned}$$

<표 1> 제안하는 DEA 순위결정 절차의 단계별 모형

Step	모형	모형의 목적 및 산출물
1	DEA-CCR 모형	·목적: FDEF를 구성하기 위한 효율적인 DMU를 파악 ·산출물: 효율적 DMU 집단
2	Olesen and Petersen 모형	·목적: 목표 효율성의 도출 ·산출물: 각 DMU의 목표 효율성 (E_j^{2*})과 FDEF
3	AR-Extended Facet 모형	·목적: 생성된 FDEF를 DEA 순위결정 모형에 반영하기 위한 단계 ·산출물: 2단계 효율적 프론티어를 이용한 Assurance Region
4	수정된 DEA 순위결정 모형	·목적: 목표 효율성 (E_j^{2*})과 거리를 오차를 최소화하는 목적 함수를 이용한 공통 가중치를 도출 ·산출물: 전체 DMU를 고려한 공통 가중치 (u^{4*}, v^{4*})

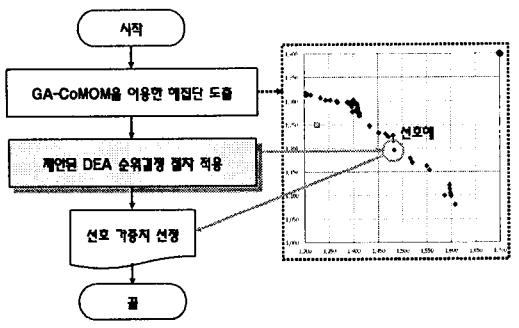
<정의 1> FDEF (Olesen and Petersen, 1996)

투입 변수의 수를 s , 산출 변수의 수를 m 으로 정의할 때, DEA-CCR 모형에서 $s+m-1$ 개의 효율적 DMU로 구성 된 효율적 패싯(Facet)을 FDEF(Full Dimensional Efficient Facet)이라고 한다.

3. DEA 순위결정 절차를 이용한 금강수계 저수지군 연계운영

본 연구에서 사용한 GA-CoMOM의 기반이 되는 CoMOM(Coordinated Multi-reservoir Operating Model)(김승권과 박영준, 1998)은 혼합정수계획(Mixed Integer Programming)형태로 2가지 상충되는 목적(저수량 최대화, 발전량 최대화)과 저수지 운영과 관련된 여러 목표(저수위의 상하한 수위 만족, 월별 용수 공급 하한의 만족 등)들이 가중합(Weighted Sum)형태로 목적 함수를 구성하고 있다. 그래서 각 가중치 요소 설정에 최적화 결과가 민감하게 반응하고, 그리하여 각 상황에 따라 저수지 운영자가 특정 CoMOM 가중치를 선정하기 힘들다.

본 연구에서는 저수지군 연계 운영에서 바람직한 가중치를 선정하기 위해 GA-CoMOM과 DEA 순위결정 절차를 활용 한 저수 가중치 선정 절차 제안하였고, 가중치 선정 절차는 <그림 1>과 같다. 우선 GA-CoMOM 최적화 모형을 통해 파레토 해를 포함한 여러 대안과 각 대안에 해당하는 저수지별 저수 가중치를 도출한다. 도출된 대안들 중 최선의 대안을 선택하기 위해서는 운영상의 다양한 기준을 고려해야 한다. 그래서 두 번째 단계로 저수량과 발전 방류량 외에 <표 2>와 같이 발전량과 각 저수지별 기간별 저수량과 목표 저수량과의 오차를 평가 기준으로 선정하여, 제안된 순위결정 절차를 적용하여 대안들간의 우열을 평가하고 가장 우수한 대안의 저수 가중치를 해당 기간의 선호 저수 가중치로 선정한다.



<그림 1> 저수지 운영을 위한 저수 가중치 선정절차

3.1. 2002년 10월 금강수계 선호 가중치 선정 예제

제안한 저수 가중치 선정절차의 현실성을 높이기 위해 저수지 운영자가 매월 의사결정 내리는 시점에, 의사결정자는 미래 정보를 모른다고 가정하였다. 그래서 불확실성한 의사결정 환경을 반영하기 위해 유입량은 평균 유입량을 사용하고, 기말 목표 저수량은 월말의 평균 저수량을 사용하였다.

Step 1) GA-CoMOM 적용

GA-CoMOM을 적용하여 <그림 2>와 <표 3>같이 상충하는 목적에 부합하는 대안들을 도출한다. 앞에서 설명한 것처럼 도출된 대안들은 단지 평균 저수량과 평균 발전 방류량만 고려된 해들이다.

Step 2) 저수 가중치 선정 절차의 적용

Step 1에서 도출된 파레토 최적해들에 대해 DEA 순위결정 절차를 이용하여 <표 3>의 대안들의 순위를 평가한다. 이 때 투입/산출 요소 간 단위의 크기가 상이한 점을 감안해서 자료값을 정규화해서 사용하였다. 도출된 대안들을 평가한 결과는 <그림 3>, <표 4>와 같고 대안들을 평가하기 위한 공통 가중치(10^{-4})는 (0.9567, 0.6338, 0.2593)이 된다. 그리고 이를 적용하여 전체 대안을 재평가하면 대안(10)이 전체 대안의 관점에서 가장 우수한 대안으로 분석되었고, 이 대안(10)의 저수 가중치(용답댐: 4, 대청댐: 9000)가 2002년 10월의 선호 가중치로 선정되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 저수지군 연계운영의 다수의 목적을 고려하는 바람직한 가중치를 선정하는 방법을 소개하였다. 이 방법은 GA-CoMOM을 통해 상충되는 목적에 대한 최적해들과 각 최적해에 해당하는 저수지별 저수 가중치를 도출하는 단계와 수정된 거리척도 기반의 DEA 순위결정기법을 이용하여 선호하는 저수지별 저수 가중치를 선정하는 단계로 구성되어 있다. 저수지군 연계운영 예제 문제에서, 의사결정자가 선정하기 어려웠던 가중치 선정을 가중치 선정 방법을 통해 객관적이고 합리적으로 가중치를 선정 할 수 있음 확인 할 수 있었다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 학보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-3)과 2007년도 두뇌한국 21사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고 문헌

- 전승목, 김재희, 김승권, (2007), DEA 순위결정 절차를 이용한 파레토 최적해의 우선순위 결정, Working Paper, Korea University
- 김승권, 박영준, (1998), 댐군의 연계운영을 위한 수학적 모형, 한국수자원학회논문집, 31(6), pp. 779~793.
- Cook, W. D. and Zhu, J., (2007), Within-group Common Weights in DEA: An Analysis of Power Plant Efficiency, European Journal of Operational Research, 178, pp 207~216.
- Kao, C and Hung, H. T (2005), Data Envelopment Analysis with Common Weights: The Compromise Solution Approach, Journal of the Operational Research Society, 56, pp 1196~1203.
- Kim, S. K., Park, Y. J., (1998) A Mathematical Model for Coordinated Multiple Reservoir Operation, Journal of Water Resources Association, 31(6), pp.779~793
- 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.
- Olesen, O. B. and Petersen, N. C., (1996), Indicators of Ill-conditioned Data Sets and Model Misspecification in Data

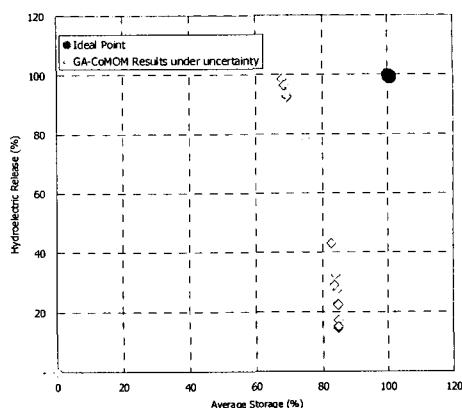
<표 2> 선호 파레토 해를 선정을 위한 DEA 투입/산출 요소

구분	내용
산출 요소(Max)	평균 발전량(GWh/day)
투입 요소(Min)	용답댐 목표 저수량 오차($10^6 m^3$) 대청댐 목표 저수량 오차($10^6 m^3$)

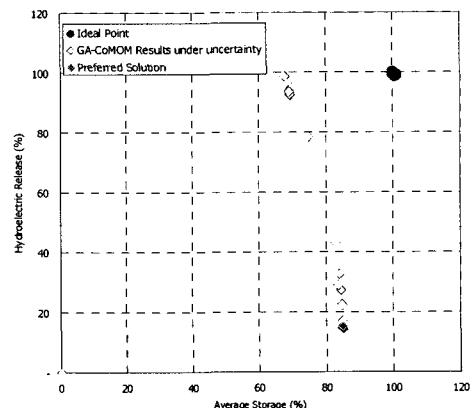
Envelopment Analysis: An Extended Facet Approach. Management Science, 42(2), pp. 205~219.

Portela, M. C. A. S. and Thanassoulis, E., (2006), Zero Weights and Non-Zero Slack: Different Solutions to the Same Problem, Annals of Operations Research, 145, pp.129~147.

YU, P. L., (1973), A Class of Solutions for Group Decision Problems, Management Science, 19(8), pp.936~946.



<그림 2> GA-CoMOM에 의해 도출된 해집합



<그림 3> 선호해 선정절차를 이용하여 선택된 선호해

<표 3> GA-CoMOM으로 도출된 해집단 (단위: $10^6 m^3$, GWh)

대안	GA-CoMOM의 결과				DEA모형을 위한 평가자료		
	용담댐 저수 가중치	대청댐 저수 가중치	평균 저수량	평균 발전 방류량	평균 발전량 (산출)	기말 목표 저수량 초과 (투입)	용담댐 대청댐
1	0.013	0.12	1319.865	24.703	2.927	311.856	46.082
2	10	0.1	1349.856	23.254	2.437	311.856	31.780
3	40	0.03	1351.236	23.139	2.404	311.856	37.934
4	60	50	1654.604	3.637	0.544	36.990	37.934
5	8	15000	1654.494	3.711	0.576	44.563	11.236
6	0.12	0.01	1333.109	24.151	2.693	311.856	16.434
7	3000	500	1653.928	4.313	0.630	24.900	37.934
8	5000	70000	1654.567	3.674	0.560	44.563	13.214
9	3	0	1345.549	23.547	2.525	311.856	16.028
10	4	9000	1654.052	3.821	0.622	44.563	5.307
11	0.03	0.3	1457.585	19.676	2.533	221.923	46.082
12	14	0.0014	1350.353	23.203	2.421	311.856	34.490
13	90000	13	1644.888	6.876	0.907	20.942	37.934
14	4	1	1346.829	23.433	2.490	311.856	22.183
15	150000	0.6	1611.855	10.762	1.316	90.460	37.934
16	80000	0.9	1636.468	8.171	1.046	44.114	37.934
17	5	150000	1654.236	3.785	0.607	44.563	7.283
18	6	7000	1654.383	3.748	0.591	44.563	9.260
19	130	9	1650.690	5.609	0.776	1.727	37.934

<표 4> 도출된 최적해 집단의 평가 결과

구분	2단계 결과	4단계 결과(10^{-4})				식(2b)의 우변 결과 (10^{-4})	최종 효율성 점수(순위)
		E_j^{2*}	u_1^*	$-v_2^*$	v_2^*		
DMU							
1	0.6473					0.0293	0.6188 (9)