

# ELECTRE IS의 수학적 구현모형을 활용한 댐군 연계운영

## Coordinated Multireservoir Operation Using a Mathematical Model Implementing ELECTRE IS

김재희\*, 이용대\*\*, 김승권\*\*\*

Jaehee Kim, Yongdae Lee, Sheung-Kown Kim

### 요 지

댐군 운영 문제는 여러 상충되는 목적 및 구성 요소들 간의 타협, 조정을 위한 다목적 특성을 갖고 있다. 본 연구의 목적은 댐군 연계 운영 문제에 대해 다기준 의사결정 기법을 적용하여 최선의 운영 계획을 수립하는 것이다. 이를 위해 순위선호(outranking) 관계와 유사기준(pseudo-criteria)을 기반으로 해서 여러 선호 대안을 선정하는 데 유용한 ELECTRE (ELimination Et Choice Translating REality)를 적용하고자 한다. ELECTRE IS는 주어진 후보 대안들 중에서 원하는 수의 대안을 선정하는 데 유용하다. 그러나 기존의 ELECTRE IS는 대안선정 과정에서 의사결정자에게 기준들의 가중치(weight), 유사기준판정 경계치(pseudo-criteria thresholds), 그리고 일치판정 기준비율(concordance level)의 매개변수에 대한 설정을 요구하고 이들의 설정 상태에 따라 도출되는 대안의 수가 달라질 수 있는 성질을 갖고 있다. 특히 일치판정 기준비율은 ELECTRE IS의 최종적인 순위선호 관계의 형성여부에 결정적 영향을 주어 매개변수의 아주 작은 변화에도 선정되는 대안의 수가 달라질 수 있다. 따라서 실제 ELECTRE IS를 적용하여 원하는 수의 대안을 선정하기 위해서는 일치판정 기준비율에 대한 반복적용이 불가피하다. 이에 본 연구에서는 CoMOM (Coordinated Multireservoir Operating Model)을 활용한 댐군 연계운영 시 제시되는 파레토 최적해 집합(Pareto set)중에서 최선의 파레토 최적해를 선정할 때 ELECTRE IS의 수학적 구현 모형을 활용할 것을 제안하고 그 방법론을 제시한다. 제안된 모형은 혼합정수계획모형으로서 ELECTRE IS를 적용하는 과정에서 일치판정 기준비율을 자동으로 도출하고, 궁극적으로 많은 반복 없이 원하는 수나 그에 근사한 수의 선호대안(핵심대안)을 도출할 수 있는 특징을 갖고 있다. 이 모형을 낙동강 수계의 댐군 연계운영 문제에 적용해 보고, 핵심대안을 효율적으로 도출할 수 있음을 보인다.

**핵심어 :** 다기준 의사결정, ELECTRE IS, 혼합정수계획모형, 댐군 연계운영

### 1. 서 론

댐 운영 방안을 수립하는 문제에는 그 특성에 따라 네트워크 최적화, 선형계획법, 동적 계획법, 비선형 계획법, 추계학적 기법, 그리고 다기준 의사결정 (Multi-criteria Decision Making) 등이 다양하게 적용되고 있다. 이 중에서 다기준 의사결정기법은 대부분의 댐 운영 문제가 여러 목적들 간의 타협, 조정을 필요로 함을 고려할 때 매우 실질적인 시도라 할 수 있다.

다기준 의사결정기법은 크게 다목적 계획법 (Multi-objective Programming)과 다요소 의사결

\* 정회원 · 군산대학교 경영회계학부 전임강사 · E-mail : jheekim@kunsan.ac.kr  
\*\* 정회원 · 고려대학교 산업시스템정보공학과 박사과정 · E-mail : ydlee@korea.ac.kr  
\*\*\* 정회원 · 고려대학교 산업시스템정보공학과 교수 · E-mail : kimsk@korea.ac.kr

정 분석(Multi-Attribute Decision Analysis)으로 분류할 수 있는데, 전자는 다목적 최적해, 즉 파레토 최적해 (Pareto-optimal solution)의 도출을 목적으로 가능해가 무수히 많으면서 비교적 논란의 여지가 적은 문제에, 그리고 후자는 주어진 후보대안들 중 하나 또는 일부를 선정하는 문제에 주로 활용되어 왔다. 1970년대 이후 다양한 다목적 계획법이 적용되어 왔으며, 대표적인 예로 Haimes and Hall (1974)과 Yeh and Becker (1982) 등을 들 수 있고, 다요소 의사결정 분야에서는 AHP, PROMETHE and ELECTRE 등이 많이 활용되었다 (Raj, 1995).

본 연구에서는 댐 군 연계운영 문제의 상충되는 목적들 간의 상대적인 중요도나 효용가치 관계식의 도출이 쉽지 않음을 감안해서, 일단의 파레토 최적해 집합을 도출한 후 의사결정자가 갖는 부분적인 선호정보를 활용해서 가장 선호하는 해를 선별하고자 했다. 이를 위해 파레토 최적해를 도출하는 다목적 계획법과 이중 선호대안을 선별하는 다요소 의사결정 기법을 동시에 활용해 보았다. 본 연구에서 사용된 절차는 해 공간을 대표할 수 있을 정도의 골고루 분포된 파레토 최적해들을 도출하기 위해 다목적 계획법의 일종인 CBITP(CHIM-based Interactive Tchebycheff Procedure)(Kim and Kim, 2006)를 적용하는 과정과 파레토 최적해 중 핵심대안을 선정하기 위해 다요소 의사결정 기법의 하나인 ELECTRE 1S를 적용하는 과정으로 나뉘볼 수 있다. ELECTRE 1S는 ELECTRE I의 일반화된 개념으로 주어진 대안들 중에서 원하는 수만큼 최선의 대안을 선정하고자 하는 문제에 활용될 수 있다. 그런데 이 기법은 대안선정 과정에서 의사결정자에게 기준들의 가중치(weight), 유사기준판정 경계치(pseudo-criteria thresholds), 그리고 일치판정 기준비율(concordance level)에 대한 설정을 요구한다. 이 중에서 기준들의 가중치와 유사기준판정 경계치들은 일반적으로 의사결정자가 지닌 평가 기준에 의해 정할 수 있다. 하지만 [0.5-1.0] 구간의 실수 값을 갖는 일치판정 기준비율은 ELECTRE 1S의 최종적인 순위선호 관계 형성 여부에 결정적인 영향을 주어 매개변수의 작은 변화에도 선정되는 대안의 수가 달라질 수 있는 특성을 갖고 있다. 따라서 실제 ELECTRE 1S를 적용하여 원하는 수의 대안을 선정하기 위해서는 일치판정 기준비율에 대한 반복적 조정이 불가피하다.

본 연구에서는 ELECTRE 1S를 대체할 수 있는 혼합정수계획 (Mixed Integer Programming, MIP)형태의 수학모형을 적용해서 댐 군 연계 운영 방안을 도출해 보았다. 이 수학모형은 기존의 ELECTRE 1S가 사용자로부터 일치판정 기준비율을 입력 받은 것과 달리, 많은 시행착오를 거치지 않고 한번에 원하는 수의 핵심대안을 효율적으로 도출할 수 있도록 설계되었다. 모형의 적용 결과 CBITP에서 제공된 파레토 최적해 집합 중 원하는 수의 핵심대안을 선별할 수 있었다.

## 2. ELECTRE 1S의 구현을 위한 수학모형

### 2.1 ELECTRE 1S의 개념

ELECTRE에서는 ‘모든 기준을 고려하여 대안 a는 대안 b보다 나쁘지 않다’라는 순위선호 ( $aSb$ ) 관계를 기반으로 한다. 유사기준은 그림 1과 같이 각 기준 k에 indifference, preference, veto 판정 경계치( $q_k, p_k, v_k$ )를 지정함으로써 구성된다. 여기서 indifference 판정 경계치에 의해 구분되는  $aI_k b$ 는 두 대안 사이에 선호관계가 없음을 의미하고, preference 판정 경계치에 의해 구분되는  $aP_k b$ 는 대안 a가 대안 b보다 확실히 좋음을 확신할 수 있음을 의미한다. ‘기준 k에 대해서 대안 a는 대안 b보다 나쁘지 않다’를 의미하는  $aS_k b$ 는 그림 1에서와 같이  $aI_k b, aQ_k b$  또는  $aP_k b$ 일 경우에 성립된다. 한편 한 기준 k에서 대안 a에 대한 대안 b의 평가치 차이( $g_k(a) - g_k(b)$ )가 veto 판정 경계치보다 크게 되면 다른 모든 기준에서  $aS_j b, j \neq k$ 가 성립된다 할지라도  $aSb$  성립을 부정하게 된다. 이 경우에 거부 효과(veto effect)가 발생되었다고 한다.

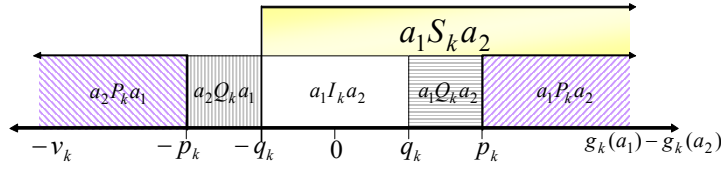


그림 1. 유사기준 경계치 개념을 이용한 순위번호 관계

ELECTRE 1S는 의사결정자의 주관적인 판단에 의해 정해지는 매개변수 설정 후 일치지수 (concordance index,  $C(a_i, a_j)$ )와 불일치지수(discordance index,  $D(a_i, a_j)$ )를 계산한다. 앞서 정의된 일치지수와 불일치 지수를 활용해서 다른 어떠한 대안들에 대하여서도 순위선호되지 (outranked, 제압당하지) 않는 핵심대안 집합(kernel set, N)으로 대안들을 선정한다.

한편, ELECTRE IS에서 최종적으로 선정되는 핵심대안의 수는  $a_i S a_j$ 의 성립 유무에 따라 달라지는데,  $a_i S a_j$  성립 유무는 일치판정 기준비율 값에 결정적인 영향을 받는다. 또한 veto 판정 경계치 역시  $a_i S a_j$  성립 유무에 큰 영향을 미친다. 즉, veto 판정 경계치를 낮게 설정하면 대부분의 경우에 거부 효과(veto effect)가 발생하여  $a_i S a_j$  성립을 부정해서 어떠한 일치판정기준 비율을 적용하더라도 원하는 수의 핵심대안을 선정하지 못할 수도 있다. 따라서 원하는 수의 대안을 도출하기 위해서는 일치판정 기준 비율값을 반복적으로 조정해야 하는 불편함이 있다. 이 때문에 본 연구에서는 다음과 같은 ELECTRE 1S를 구현한 수학적 모형을 활용하고자 한다.

## 2.2 ELECTRE 1S의 구현을 위한 수학 모형

ELECTRE 1S를 위한 수학 모형은 원하는 대안의 수  $A_N$ 를 도출할 수 있는 목표계획기법 형태를 갖는다. 이 모형을 구성하는 다음의 식은 모두 ELECTRE 1S를 위한 식을 최적화 모형의 형태로 구현한 것으로 모형에 대한 자세한 설명은 박석영 외 (2005)에 나타나 있다.

$$\min (A_N^+ + A_N^-) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \text{Sel}A_i - A_N^+ + A_N^- = A_N \quad (2)$$

$$\text{Sel}A_j + \sum_{i=1, i \neq j}^n S_{ij} \geq 1 \quad (3)$$

$$Y \text{Sel}A_j - \sum_{i=1, i \neq j}^n S_{ij} / n \geq 0 \quad (4)$$

$$\text{Sel}A_j + Y \text{Sel}A_j = 1 \quad (5)$$

$$S_{ij} - (C(a_i, a_j) - s + \epsilon) + D_{ij} \geq 0 \quad (6)$$

$$2 Y S_{ij} + (C(a_i, a_j) - s) - D_{ij} \geq 0 \quad (7)$$

$$S_{ij} + Y S_{ij} = 1 \quad (8)$$

$$D_{ij} \geq \sum_{k=1}^m d_{ij}^k / m \quad (9)$$

$$Y D_{ij} \geq 1 - \sum_{k=1}^m d_{ij}^k \quad (10)$$

$$D_{ij} + Y D_{ij} = 1 \quad (11)$$

$$D_{ij} \geq \sum_{k=1}^m d_{ij}^k / m \quad (12)$$

$$Y D_{ij} \geq 1 - \sum_{k=1}^m d_{ij}^k \quad (13)$$

$$D_{ij} + Y D_{ij} = 1 \quad (14)$$

### 3. 댐군 연계운명을 위한 다기준 의사결정 기법

본 연구에서는 낙동강 수계의 댐 군 연계운영 문제에 다기준 의사결정 기법을 적용해 보았다. 모형의 실증을 위해 2003년 실적 자료를 사용하였으며, 댐 군 연계운명을 모사하기 위한 엔진으로 CoMOM (김승권 & 박영준, 1998; Kim et al., 2004, Kim et al., 2005)을 활용하였다. CoMOM은 2개의 상충하는 목적(objective), 즉 목표저수위와의 오차와 발전방류량 최대화를 포함해서 총 10개의 목표(goal)를 고려하고 있다. 이 중 8개는 댐 운영과 관련한 제약에 해당하는 데 이들은 나머지 2개의 목적에 우선해서 만족시켜야 하는 목적이다. 또한 CoMOM의 적용 과정에서 단위분석기간을 이수기는 1개월, 홍수기는 5일로 설정했다.

다기준 의사결정 분석의 절차에서는 우선적으로 CBITP를 이용해서 해 공간에 골고루 분포한 파레토 집합을 도출한다 (Kim et al., 2004; Kim and Kim, 2006). CBITP의 목적함수의 개수는 상충관계를 갖는 목적의 개수에 해당한다. 따라서 2개의 목적을 갖는 것으로 간주하고 CBITP를 수행했다. 또한 매 반복 (iteration)마다 도출하는 파레토 최적해의 개수는 10개로 설정했다.

한편, 앞서 도출된 파레토 최적해들은 각 목적간의 상대적인 효용가치가 반영되지 않은 것으로서, 단지 의사결정자의 선택의 폭을 넓힐 수 있도록 넓은 범위에서 추출된 해들이다. 따라서 이들 해들은 열등하지 않은 후보 대안일 뿐이며, 여기서 좋은 해를 선별하기 위해서는 완전한 가중치나 효용함수는 아니더라도 의사결정자가 가진 각 목적들에 대한 상대적인 선호정보를 반영해서 결정하는 것이 바람직하다. 따라서 CBITP가 도출한 파레토 최적해 집합을 대상으로 각 목적(기준)들에 대한 부분적인 선호정보를 활용해서 바람직한 핵심대안을 선별할 수 있는 ELECTRE 1S의 개념을 활용하고자 했다. 이를 위해 기존의 ELECTRE 1S의 단점을 개선할 수 있도록 설계된 2.2절의 MIP 모형을 적용했다. 여기서는 4개의 댐에 각각 2개의 상충하는 목적이 있음을 고려해서 총 8개의 항목을 별도의 목적으로 간주했다. 이것은 2개의 목적간의 상충관계 뿐 아니라 4개 댐 간의 상호 관계를 동시에 고려해서 핵심대안을 도출한 것으로 볼 수 있다. MIP모형의 적용과정에서 핵심 대안의 총 수는 3으로 설정했다.

### 4. 모형 수행 결과

표 1은 CBITP를 적용해서 첫 번째 반복에서 구한 10개의 파레토 최적해 들과 ELECTRE 1S에 의해서 선별된 3개의 핵심대안을 보여준다. 여기서 유역 내 4개 댐의 목표저수위로부터 미달된 양과 발전량의 크기를 ELECTRE 1S 관점에서 볼 때 8가지 다중 기준에 해당되는 것으로 간주하고, 댐 운영자는 8개의 기준에 해당하는 값과 제시된 파레토 최적해 대안에 해당되는 기간별 저수위 변화추이를 토대로 선호하는 운영 방안을 선택한다. 이렇게 함으로써 선택의 범위를 줄여 줌과 동시에 댐 운영자가 내재적으로 그리고 경험적으로 가지고 있는 상대적 선호 정보를 댐군 연계 운영에 최대한 반영시키고자 하였다. 지면 관계상 수록하지 않았지만, 저수위 변화추이까지 고려해 볼 때 No. 1-6의 결과가 목표 저수위와의 오차가 적어 바람직한 대안으로 판단된다. 따라서 No. 1-6은 CBITP의 다음 반복 (iteration)을 위한 중심점이 되고, CBITP는 이 포인트를 중심으로 공간을 줄이는 대화형 의사결정 과정을 거친다 (Kim and Kim, 2004).

### 5. 결론

본 연구에서는 댐 군 연계 운영 문제에 적용할 수 있는 다기준 의사결정 절차를 소개하였다. 이 절차에서는 우선 해 공간에서 골고루 분포된 파레토 최적해를 도출할 수 있는 CBITP를 이용

표 1. 반복 1에서 도출된 파레토 최적해와 핵심대안 집합

파레토 최적해	8개의 기준 (criteria)								핵심대안
	목표저수위와의 오차 (TCM)				발전량 (Kwh)				
No 1-1	67,836	10,088	785	38,098	89,934	63,568	159,830	26,038	*
No 1-2	67,836	34,135	785	38,098	89,934	65,149	159,830	24,565	
No 1-3	66,110	58,833	785	38,098	90,099	65,695	159,830	25,801	
No 1-4	39,686	58,833	785	38,098	92,579	65,695	159,830	26,093	
No 1-5	13,261	58,833	785	38,098	95,000	65,695	159,830	26,093	
No 1-6	13,163	58,833	785	38,098	97,326	65,695	159,830	25,862	*
No 1-7	39,588	58,833	785	38,098	99,603	65,695	159,830	25,125	
No 1-8	66,012	58,833	785	38,098	101,779	65,695	159,830	24,416	
No 1-9	92,437	58,833	785	38,098	103,908	65,695	159,830	25,856	
No 1-10	110,099	58,833	7,170	38,098	105,265	65,695	160,894	24,416	*

해서 다수의 파레토 최적해를 도출했으며, ELECTRE 1S를 대체할 수 있는 수학 모형을 적용해서 앞서 도출된 파레토 최적해 중 원하는 수만큼의 핵심대안을 선별할 수 있었다. ELECTRE 1S를 대체한 모형은 혼합정수계획 형태로 수립되었으며, 당초의 ELECTRE 1S가 원하는 수의 핵심대안을 도출하기 위해 일치판정 기준비율을 반복적으로 조정하는 것과 달리, 목표계획기법을 활용해서 설정한 수의 핵심대안을 도출할 수 있도록 하고, 일치판정 비율은 모형의 결과로 자동 산출될 수 있도록 한 것이다. 이 방법을 통해 ELECTRE 1S의 반복적인 매개변수 조정에 따른 불편 없이 댐군 연계 운영을 위한 핵심 대안을 도출할 수 있었다.

### 감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원 (과제번호: 1-6-2)에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. 김승권, 박영준 (1998). 댐군의 연계운영을 위한 수학적 모형, 한국수자원학회논문집, 제31권, 제6호, pp. 779-793.
2. 박석영, 김재희, 김승권 (2005). ELECTRES IS의 구현 시 일치판정 기준비율 도출과 핵심대안 선정을 위한 혼합정수계획 모형, 대한산업공학회지, 제31권, 제4호, pp. 265-276.
3. Kim J. H. and Kim S. K.(2006). A CHIM-based interactive Tchebycheff procedure for multiple objective decision making, Computers & Operations Research, Elsevier, Vol. 33, No. 6, pp. 1557-1574.
4. Kim, S. K., Kim, J. H., and Ko, I. H.(2004). Interactive multi objective decision making for operation of a multi-reservoir system, Proceedings of 6th International Conference on Hydroinformatics, Singapore, pp. 961-968.
5. 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, Vol. 5, Issue 3-4, pp 81-88.