

일별 저수지군 연계운영시 하도 추적 효과 반영을 위한 혼합 정수계획 모형

이용대(Yongdae Lee)*, 김재희(Jaehye Kim)*, 김승권(Sheung-Kown Kim)*, 고익환(Ick-Hwan Ko)**

1. 서론

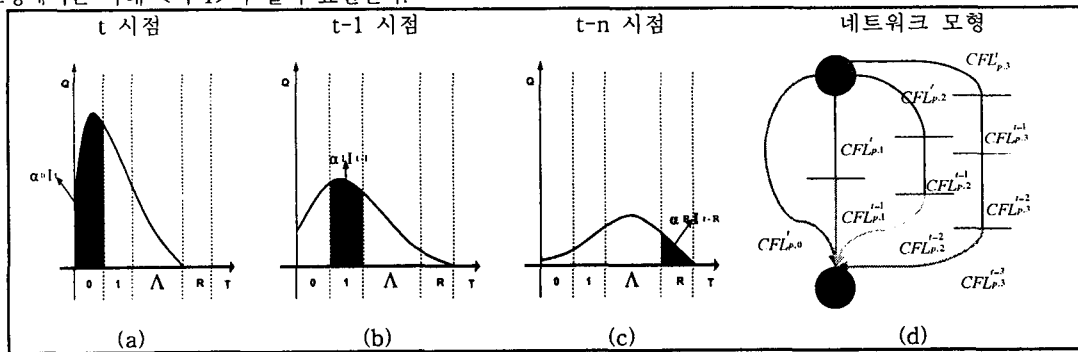
일별 저수지군 최적 연계운영모형은 월간 계획을 준수하며 일별 운영의 특성을 적절히 반영한 가운데 수자원을 가장 효율적으로 사용할 수 있는 운영 방안을 제시하여야 한다. 특히 단기 운영은 댐 또는 조절점에서 방류한 물의 도달 시간이 단위 분석 기간보다 긴 경우 하도 추적의 효과를 반영할 필요가 있다. 하도 추적이 흐름량과 저류량 사이의 상관관계를 이용한 하천 구간별 유량 흐름의 단기간(시간별) 현상을 모형화 하는 것이라면, 본 연구에서는 운영 기간이 일간이므로 하도추적 결과에 따른 구간별 흐름량의 지체 현상을 반영 하고자 하였다. 이와 같은 지체 효과를 모형에 반영하기 위하여 본 연구에서는 혼합 정수 계획법(MIP, Mixed Integer Programming)을 이용하였다.

혼합 정수 계획법(MIP, Mixed Integer Programming)을 이용하여 하도 추적의 효과를 반영하기 위하여 댐 또는 조절점에서 방류한 물이 지체 시간(lagged time) 후 도달 지점에 도착하는 모습을 그래프로 나타내었고, 이 그래프를 단위 분석 기간으로 나누어 지체 시간(lagged unit time) 별 비율 상수로 표현되도록 하였다. 이때 이 그래프는 방류량에 따라 다르게 표현 될 수 있지만, 가능한 모든 방류량에 대해 분석할 경우 모형의 크기가 매우 커지므로, 방류량의 범위를 설정하고, 각 범위에 해당하는 지체 시간(lagged unit time) 별 비율 상수를 입력하여 다른 형태의 그래프로 표현 되도록 하였다. 한편 그래프를 결정하는 지체 시간(lagged unit time) 별 비율 상수는 머스킹검 모형(Muskingum Routing)을 이용하여 설정하였으며, 하도 추적 시뮬레이션 모형을 이용하여 검증하게 된다.

2. 하도 추적 효과를 반영한 수학 모형의 수립

단기 운영의 경우 정확한 용수 공급을 위하여 수계내의 댐 또는 조절점에서 방류한 물이 도달 지점에 도달하는 시간이 분석 기간보다 긴 경우 하도 추적을 반영하여야 한다.

도달 지점까지의 도달 시간은 댐 또는 조절점에서의 방류량에 따라 다르게 나타나며, <그림 1>과 같이 방류량에 따라 서로 다른 Routing Curve를 갖게 된다. 한편 각각의 Routing Curve는 <그림 1>과 같이 r 기간 후에 도달 지점에 도착하는 물의 비율을 α_r 로 갖고, 이때의 α_r 는 Routing Curve를 구간별로 선형화하여 구할 수 있다. 그리고 t 시점에 방류해서 r 기간 후에 도달 지점에 도착하는 물의 양은 $\alpha_r I_t$ 가 된다. 이때 I_t 는 하도 유입량, 즉 댐 또는 조절점에서의 방류량이 된다. 한편 t 시점의 하도 유출량, 즉 도달 지점 유입량은 $O_t = \alpha_0 I_t + \alpha_1 I_{t-1} + \dots + \alpha_R I_{t-R}$ 과 같다. 즉 <그림 1> 과 같이 도달 지점에 도달하는 유입량은 방류지점에서 $t-r$ 시점에 방류한 물 중 r 기간 후에 들어오는 물의 양($\alpha_r I_{t-r}$)의 총합(<그림 1>의 어두운 부분의 합)과 같고 수학 모형에서는 아래 <식 1>과 같이 표현된다.



<그림 1> 각 시점별 방류량에 대한 Routing Curve의 예

* 고려대학교 산업시스템정보공학과
** 한국수자원공사 수자원연구소

한편 이와 같은 하도 추적을 네트워크 모형으로 표현하면 <그림 1>의 (d)와 같다. CFL'_{pr} 아크는 p 지점에서 방류한 물이 아래 지점으로 r 기간의 도달 시간을 거쳐 도달함을 의미한다. 즉 CFL'_{pr} 는 전체 방류량(I_i) 중에서 방류량(I_i) 크기에 따라 결정된 L 개의 Routing Curve 중 실제 방류량에 해당하는 Routing Curve의 도달 기간 r에 해당하는 비율 상수 α_{prl} 의 비율만큼($\alpha_{prl}I_i$)을 의미하고 아래 <식 2>~<식 6>을 통해 표현된다.

$$\sum_{r=0}^R CFL'_{pr} = \sum_{u \in UCSC} \sum_{r=0}^R CFL'_{ur} \quad \text{for } p \in CPS, t \in TPS \quad \text{<식1>}$$

$$CFL'_{pr} = \sum_{l=0}^L CFR'_{prl} \quad \text{for } p \in CPS, t \in TPS, r=0,1,\dots,R \quad \text{<식2>}$$

$$CFR'_{prl} \leq CFL^{\max} BV_CFR'_{pl} \quad \text{for } p \in CPS, t \in TPS, r=0,1,\dots,R, l=1,2,\dots,L \quad \text{<식3>}$$

$$\sum_{l=0}^L BV_CFR'_{pl} = 1 \quad \text{for } p \in CPS, t \in TPS \quad \text{<식4>}$$

$$CRC_{pl} \cdot BV_CFR'_{pl} \leq \sum_{r=0}^R CFR'_{prl} \leq CRC_{pl+1} \cdot BV_CFR'_{pl} \quad \text{for } p \in CPS, t \in TPS \quad \text{<식5>}$$

$$CFR'_{prl} \leq \alpha_{prl} \sum_{k=0}^R CFL'_{pk} \quad \text{for } p \in CPS, t \in TPS, r=0,1,\dots,R, l=1,2,\dots,L \quad \text{<식6>}$$

위 식을 좀 더 자세히 살펴보면 <식 1>은 조절점 p에서 t 시점에 방류 할 수 있는 물은 상위 방류지점 집합(UCSC)에서 방류한 물 중 t시점에 p 지점에 도달한 양의 합과 같음을 의미한다.

한편 CFL'_{pr} 을 결정하기 위한 <식 2>~<식 6>을 살펴보면, 먼저 CFR'_{prl} 은 p지점으로부터 방류되는 총 방류량이 l 번째 구간에 있을 때 하류 지점으로 r의 도달 시간을 거쳐 도달함을 의미하며, <식 3> ~<식 5>에 의해 p 지점으로부터 방류되는 총 방류량이 l 번째 구간에 있을 때만 0보다 큰 값을 갖게 된다. 이 때 CFL^{\max} 는 하도에 흐를 수 있는 최대 유량으로 CFR'_{prl} 의 상한 값이 되고, $BV_CFR'_{pl}$ 은 0과 1 값을 갖는 이진 변수로서 p지점으로부터 방류되는 총 방류량이 l 번째 구간에 있음을 지칭해 주며, CRC_{pl} 은 p 지점의 l 번째 구간 방류량의 하한 값이 된다.

그리고 <식 6>은 CFR'_{prl} 은 p지점으로부터 방류되는 총 방류량이 l 번째 구간에 해당하는 방류량에 대한 Channel Routing의 도달 기간이 r일 때, 비율상수 α_{prl} 과 p지점으로부터 방류되는 총 방류량의 곱으로 결정됨을 의미한다. 여기서 비율상수 α_{prl} 은 실적치와 비교하여 현실에 맞게 계속 보정되어야 한다.

3. 일별 운영을 위한 다중목적 혼합정수계획 모형의 수립

3.1 목적함수

목적함수는 저수량 최대화, 여수로 방류량 최소화, 용수 부족 최소화, 발전량(발전 방류량) 최대화, 홍수기 유수위 초과억제, 분석기간말 목표저수위 확보 등을 가중합계법(Weighted-Sums Method) 및 목표계획법(Goal Programming)을 이용하여 다중목적계획법으로 구성하였다.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{i=1}^T \sum_{i \in RES} (ps_{tr_i} STR'_i + ps_{pl_i} \sum_{p \in DCSR_i} SPL'_{ip}) + \sum_{j=1}^T \sum_{j \in DMS} pd_{sh_j} DSH'_j + \sum_{i \in TAP} \sum_{i \in RES} pbsr_i BSR'_i \\ & + \sum_{i=1}^T \sum_{k \in PLT} pepr_k EPR'_{ik} + \sum_{i=1}^T \sum_{i \in RES} (povr_i OVR'_i + ptgr_i TGR'_i + ptgr_i TGR'_i) \end{aligned} \quad (1)$$

3.2 제약식

■ 각 변수의 상·하한 제약

$$\text{저수위} : LWLQ_i \leq STR'_i \leq NHWQ_i \quad \text{for } i \in RES, t \in TPS \quad (2)$$

$$\text{총 방류량} : RLS_{ip}^{\min} \leq RLS'_{ip} \leq RLS_{ip}^{\max} \quad \text{for } i \in RES, t \in TPS, p \in DCSR_i \quad (3)$$

$$\text{여수로 방류량} : SPL'_{ip} \leq SPL_{ip}^{\max} \quad \text{for } i \in RES, t \in TPS, p \in DCSR_i \quad (4)$$

$$\text{발전 방류량} : EPR'_{ik} \leq EPR_{ik}^{\max} \quad \text{for } i \in RES, k \in PLT, t \in TPS \quad (5)$$

$$\text{용수 부족} : DSH'_j \leq DMD'_j \quad \text{for } j \in DMS, t \in TPS \quad (6)$$

$$\text{조절점 용수 공급 관로} : WSC'_{pj} \leq CCAPA_{pj} \quad \text{for } j \in DMS, p \in DCSR_i, t \in TPS \quad (7)$$

$$\text{저수지 용수 공급 관로} : WSD'_{ij} \leq DCAPA_{ij} \quad \text{for } i \in RES, j \in DMS, t \in TPS \quad (8)$$

- 홍수기 유지수위(제한 수위) 초과 억제 및 최저 확보 수위 유지

$$STR'_i - MWLQ_i - OVR'_i \leq 0 \quad \text{for } i \in RES, t \in FLP \quad (9)$$

$$STR'_i - RSTR_i + BSR'_i \geq 0 \quad \text{for } i \in RES, t \in TAP \quad (10)$$
- 여수로 방류 제약(제한수위 이상에서만 여수로 방류 가능)

$$BV_SPL'_i \leq STR'_{ip} / MWLQ_i \quad \text{for } i \in RES, p \in DCSR_i, t \in TPS \quad (11)$$

$$SPL'_{ip} \leq SPL^{max}_{ip} \cdot BV_SPL'_i \quad \text{for } i \in RES, p \in DCSR_i, t \in TPS \quad (12)$$
- Water Balance 제약식

수요지 : $DMD'_j = DSH'_j + \sum_{i \in URSD} WSD'_{ij} + \sum_{p \in UCSR} WSC'_{pj} \quad \text{for } j \in DMS, t \in TPS \quad (13)$

소유역 : $\sum_{i \in DRSS} DLI'_{si} + \sum_{p \in DCSS} CLI'_{sp} = ROA'_s + \sum_{j \in UDRS} RRF_j (DMD'_j - DSH'_j) \quad \text{for } j \in DMS, t \in TPS \quad (14)$

조절점 : $\sum_{r=0}^R CFL'_{pr} + \sum_{j \in UMSC} WSC'_{pj} = \sum_{i \in URSR} RLS'_{ip} + \sum_{i \in UCSR} \sum_{r=0}^R CFL'_{ir} + \sum_{s \in UMSC} CLI'_{sp} \quad \text{for } p \in CPS, t \in TPS \quad (19)$
- 저수지의 Water Balance 제약식

$$STR'_i + \sum_{p \in DCSR} RLS'_{ip} + \sum_{j \in UDRS} WSD'_{ij} = STR'_i^{-1} + \sum_{s \in URSR} DLI'_{si} + \sum_{p \in UCSR} DCI'_{pi} \quad \text{for } i \in RES, t \in TP \quad (15)$$

$$RLS'_{ip} = HPR'_{ip} + SPL'_{ip} + OLR'_{ip} \quad \text{for } p \in DCSR_i, i \in RES, t \in TPS \quad (16)$$

$$EPR'_{ik} = HPR'_{ip} \quad \text{for } i \in RES, p \in DCS_i, k \in DPSR_i, t \in TPS \quad (17)$$

$$DCI'_{pi} = \sum_{r=0}^R CFL'_{pr} \quad \text{for } p \in UCSR_i, i \in RES, t \in TPS \quad (18)$$
- 하도 추적 제약식 : <식 1> ~ <식 6>

4. 모형의 적용 및 사례 연구

본 연구에서는 수립된 모형을 금강 수계에 적용하여 보았다. 금강 수계에는 총 12개의 소유역, 2개의 다목적댐(용담댐, 대청댐), 3개의 발전소, 5개의 수요지 그리고 총 11개의 하도 구간이 있다. 이 때 총 11개의 하도 구간 중에서 구간이 짧고, 용수 공급 및 저수지 운영 계획에 영향을 주지 않는 5개의 하도 구간을 제외하고 6개의 하도 구간에 대해서 하도 추적 효과를 반영하여 모형을 수행 하였다. 이때 하도추적계수(α_{pr})는 머스킹검 모형(Muskingum Routing)을 이용하여 설정하였으며, 평·갈수기와 홍수기 두개 방류량 구간을 설정하였으며, 설정된 하도추적계수는 <표 1>과 같다

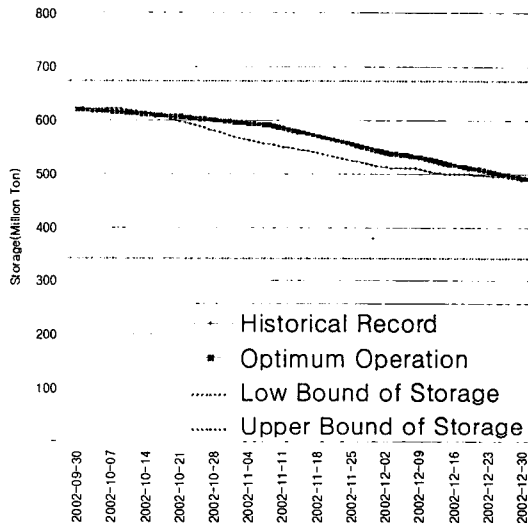
<표 1> Muskingum Routing을 이용하여 설정된 하도추적계수

구분	구간	거리 (km)	홍수파 (m/s)	매개변수 (x)	매개변수 (K)	하도추적계수				
						C1(α_0)	C2(α_1)	C3(α_2)	C4(α_3)	C5(α_4)
평·갈수기	용담-수통	43.10	0.70	0.20	17.10	0.334	0.622	0.044	-	-
	수통-호탄	27.40	0.60	0.05	12.69	0.473	0.527	-	-	-
	호탄-옥천	39.50	0.70	0.20	15.67	0.361	0.625	0.014	-	-
	대청-공주	48.90	0.50	0.25	27.14	0.161	0.622	0.161	0.042	0.014
	석화-공주	26.60	0.50	0.15	14.79	0.398	0.588	0.014	-	-
	공주-규암	33.50	0.50	0.25	18.58	0.284	0.663	0.053	-	-
	규암-강경	27.80	0.50	0.20	15.42	0.366	0.625	0.009	-	-
	논산-강경	8.60	0.50	-	-	1.000	-	-	-	-
홍수기	용담-수통	43.10	1.50	0.20	7.98	0.980	0.020	-	-	-
	수통-호탄	27.40	1.50	0.40	5.07	0.994	0.006	-	-	-
	호탄-옥천	39.50	1.50	0.15	7.31	0.989	0.011	-	-	-
	대청-공주	48.90	1.20	0.20	11.31	0.848	0.146	0.004	-	-
	석화-공주	26.60	1.20	0.01	6.16	0.996	0.004	-	-	-
	공주-규암	33.50	1.20	0.20	7.74	0.990	0.010	-	-	-
	규암-강경	27.80	1.20	0.05	6.42	0.996	0.004	-	-	-
	논산-강경	8.60	1.20	-	-	1.000	-	-	-	-

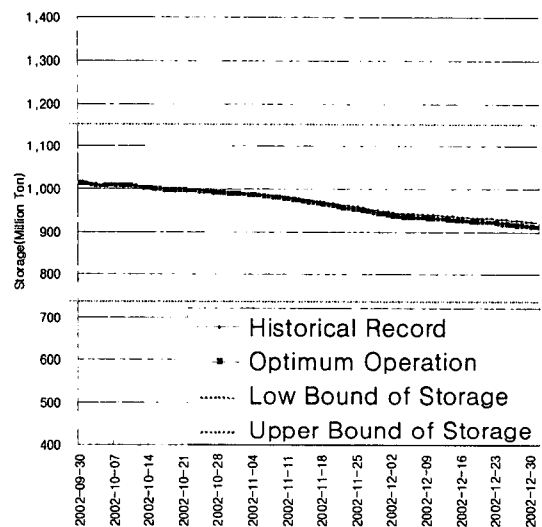
<표 1>에서는 총 8개 구간의 하도에 대한 하도 추적을 고려하였지만 석화-공주, 논산-강경은 소유역의 유출량이 바로 조절점으로 들어오는 하도 구간으로 저수지 운영 결과가 영향을 미치지 않으므로 자료 입력 단계에서 하도 추적 결과를 반영하였고, 모형에서는 이들 두 구간을 제외한 6개 하도에 대하여 하도 추적을 적용하였다.

한편 <표 1>가 의미하는 바를 평·갈수기 용담-수통 자료를 예로 살펴보면, 용담에서 100 만㎤를 방류하였을 때, 수통 조절점에는 100에 해당하는 물중 당일에 약 33.4 만㎤의 물이 들어오고, 다음날 62.2, 이틀 후에 4.4 만㎤의 물이 들어옴을 의미한다.

이와 같은 모형을 2002년 10월 1일 ~ 2002년 12월 31일까지 3개월간 일별로 수행 한 결과 저수량은 실적 운영 결과 보다 1% 증가하였고, 발전 방류량은 5% 증가하였으며, 발전량은 8% 증가하였다. 그리고 여수로 방류량은 21% 감소함을 알 수 있었다. 한편 각 다목적 댐의 운영 결과를 살펴보면 <그림 2>, <그림 3>과 같다. 먼저 <그림 2>를 보면 실적치보다 전반적으로 높은 수위를 유지하다가 기말에 목표 수위를 맞추기 위하여 실적 운영결과와 같은 수위를 유지함을 알 수 있다. 그리고 <그림 3>을 보면 실적운영과 거의 같은 운영 결과를 보여주는데 이는 저수 우선순위가 상류에 있는 용담댐이 높기 때문이다.



<그림 2> 용담댐 실적 운영대비 최적 운영 결과



<그림 3> 대청댐 실적 운영대비 최적 운영 결과

5. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 하도 추적 효과를 고려한 일별 저수지군 최적 연계운영 모형을 수립하였다. 이 모형은 하도 추적을 혼합 정수 계획 모형으로 수립하여 일별 운영 현상을 어느 정도 정확히 반영하였으며, 효과 적인 용수 공급 및 저수지군 연계운영 계획을 수립할 수 있도록 하였다.

한편 본 연구 결과가 실제 현실에 적용되어 실질적인 수자원 확보에 기여하기 위해서는 하도추적 비율 상승들에 대한 좀더 면밀한 확인과 보정 과정을 진행하여야 하며, 이를 적용한 결과에 대하여 실적 자료와 시뮬레이션 모형 수행 결과 등과 비교 검토하여 철저한 검증이 이루어 져야 할 것이다. 그리고 효과적인 실시간 적용 방안 도출을 위하여 실시간 운영 상황을 가정한 시뮬레이션 연구를 통해 여러 운영 대안에 대한 비교 평가를 진행하여 효과를 분석하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-6-1)에 의해 수행되었습니다. 그리고 모형 개발 및 수행에 사용된 ILOG 소프트웨어를 고려대학교에 기증해 주신 KSTEC에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김승권, 박영준 (1998), "댐 군의 연계운영을 위한 수학적 모형", 한국수자원학회 논문집, 31(6), 777~791
2. 이용대, 김재희, 김승권, 고익환(2002), "댐군 연계 운영을 위한 개체지향적 최적 운영 모형의 개발", 2002 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp.673-678
3. 이용대, 김재희, 김승권, 고익환(2002), "일별저수지군 연계운영을 위한 수학적 모형" 대한 토목학회 학술발표회 논문집, pp285-288