

유입량 예측을 이용한 댐군의 연계운영기법

Operation of Multi-Reservoirs Using Inflow Forecasting

○김 태 순*, 허 준 행**, 조 원 칠***

1. 서론

사회가 발달하고, 인구가 늘어날수록 전력량이나 용수량과 같은 기본적인 자원에 대한 수요는 늘어나게 된다. 특히, 서울을 포함한 수도권의 전력공급과 용수공급을 담당하고 있는 한강수계는 사용 가능한 수자원 총량이 상대적으로 점점 더 부족해지는 데도 불구하고, 새로운 수자원 개발을 위한 댐의 건설은 지역적인 반대나 환경적인 문제로 인해서 계속해서 늦어지고 있는 실정이다. 수자원을 개발하기 위한 여러 가지 방법 중에서 가장 효과가 큰 것은 새로운 댐을 건설하는 것이지만, 앞에서 언급한 것과 같은 이유로 인해서 댐의 건설이 늦어진다면, 연계운영기법과 같은 보다 효과적인 방법을 통해서 기존 댐을 운영하는 방법을 고려해 볼 수 있다.

본 연구의 목적은 유입량 예측기법을 이용한 댐군의 장기 연계운영효과를 살펴보고, 실시간 제어를 위한 적용성을 검토하는 것이다. 즉, 입력자료중 가장 중요한 각 댐의 유입량 자료는 추계학적인 모형을 이용해서 예측하고, 이 값을 확정적인 값으로 고려해서 동적계획법의 입력자료로 이용하는 방법을 사용했다. 이런 과정을 거치면 추계학적인 특성을 가지는 동적계획법을 이용해서 댐군의 연계운영을 모의할 수 있다.

2. 기본이론

2.1 유입량 예측기법

주기성 자료를 $x_{\nu, \tau}$ 라고 하고 ν 는 연도를, τ 는 일간, 주간, 월간, 혹은 계절별의 시간간격이라고 하고, $x_{\nu, \tau}$ 를 정규화시킨 값을 $y_{\nu, \tau}$, 표준화한 값을 $z_{\nu, \tau}$ 라고 한다면 다변량인 경우 식 (1)을 이용해서 자료를 나타낼 수 있다.

$$Y_{\nu, \tau} = \mu_{\tau} + \sigma_{\tau} Z_{\nu, \tau} \quad (1)$$

여기서, $Y_{\nu, \tau}$ 는 요소가 $y_{\nu, \tau}^{(i)}$ 인 $(n \times 1)$ 벡터, μ_{τ} 는 요소가 $\mu_{\tau}^{(i)}$ 인 $(n \times 1)$ 대각행렬, σ_{τ} 는 요소가 $\sigma_{\tau}^{(i)}$ 인 $(n \times n)$ 대각행렬, $Z_{\nu, \tau}$ 는 요소가 $z_{\nu, \tau}^{(i)}$ 인 $(n \times 1)$ 벡터를 의미하고, $\mu_{\tau}^{(i)}$, $\sigma_{\tau}^{(i)}$ 는 각 시간간격별, 지점별 평균과 표준편차를 뜻한다. $Z_{\nu, \tau}$ 를 모형화하기 위해서 주기적 매개변수를 가지는 다변량

* 연세대학교 토목공학과 박사과정

** 연세대학교 토목공학과 부 교수

*** 연세대학교 토목공학과 교수

AR(1)을 생각하면 다음의 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$Z_{v,t} = A_{1,t} Z_{v,t-1} + B_t \epsilon_{v,t} \quad (2)$$

여기서, $A_{1,t}$, B_t 는 시간간격 τ 와 관계된 ($n \times n$) 행렬을, $\epsilon_{v,t}$ 는 시간에 대해서 독립적이고, 정규분포를 이루고 있는 임의의 변수를 의미한다. $Z_{v,t}$ 와 $\epsilon_{v,t}$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 변수이고, 임의변수 $\epsilon_{v,t}$ 는 교차상관성이 없다고 가정한다.

이제 선행시간 L만큼이 지난 후의 실제 관측값을 $Z_{v,t+L}$ 이라고 하고 각 항의 조건부 기대값을 취하면 다음 식을 만들 수 있다.

$$[Z_{v,t+L}] = A_{1,t}[Z_{v,t-1+L}] + B_t[\epsilon_{v,t+L}] \quad (3)$$

식 (3)에 예측값을 구할 때 쓰는 예측법칙(rule for forecasting)을 적용하면, 선행시간 L이 지난 후의 $Z_{v,t}(L)$ 을 구할 수 있고, 선행시간 $L = 1$ 인 경우의 예측값을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_{v,t}(1) &= A_{1,t}[Z_{v,t}] + B_t[\epsilon_{v,t+1}] \\ &= A_{1,t} Z_{v,t} \end{aligned} \quad (4)$$

같은 단계를 거치면 L이 2 이상인 경우는 다음과 같은 일반식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{v,t}(L) &= A_{1,t}[Z_{v,t-1+L}] + B_t[\epsilon_{v,t+L}] \\ &= A_{1,t} Z_{v,t}(L-1) \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 확정론적 동적계획법

본 연구에서 사용한 최적화 프로그램인 CSUDP는 Labadie(1988)에 의해 개발된 프로그램으로 최적화 기법중의 하나인 증분동적계획법(incremental dynamic programming; IDP)을 사용하고 있다. 증분동적계획법이란 동적계획법의 순환방정식을 푸는 반복계산 방법으로, 미리 정의된 목적함수를 초기케적값의 주위를 따라서 계산한 후, 목적함수가 보다 더 나은 값을 갖는 케적을 찾을 수 있으면, 이 케적을 다시 초기케적으로 대치한 후 반복계산한다. 만약에, 케적값의 변화가 있는에도 목적함수값의 변화가 없거나, 미리 정한 수렴값의 범위내로 목적함수값이 변하게 되면 반복계산을 마치고 결과값을 출력하게 된다(Hall 등, 1969; Trott 와 Yeh, 1971).

이러한 IDP 방법은 제약조건이 변할 수 있는 전 범위를 걸쳐서 목적함수값의 변화를 구하는 것이 아니기 때문에, 전영역 최적해(global optimum)를 구하지 못하는 단점이 있지만, 프로그램을 수행하는 과정에서 초기 케적값을 미리 정해진 규칙에 의해서 조정하여 입력하거나, 몇 번의 시행을 거쳐서 목적함수 값을 추적하면, 최적해가 국부 최적해(local optimum)로 되는 것을 최소화 할 수 있다.

3. 모형의 적용

3.1 다변량 AR(1) 모형

시계열 모형을 구성하기 위한 자료는 화천댐, 소양강댐, 충주댐의 1971년~1993년의 23년간의 월간 유입량 자료를 사용했고, 이 자료를 대수변환(log transformation)을 이용해서 정규화시킨 자료로 매개변수를 추정했다. 모형의 매개변수는 Salas 등(1996)이 개발한 SAMS(stochastic analysis, modeling, and simulation)를 이용해서 계산했고, 이렇게 구한 매개변수를 이용해서 예측모형을 구성한 후에 유입량의 예측값을 구한다.

최적화 모형은 1994년 1월의 방류량을 결정하는 것부터 시작하므로, 첫 번째의 기준시간은 1993년 12월이 되고, 1993년 12월부터 선행시간이 12인 1994년 12월까지의 유입량을 예측해서, 1994년 1월의 방류량을 결정하는 것이다. 즉, $z_1(12)$ 는 기준시간이 1(1993년 12월)이고, 선행시간이 12인 예측값을 뜻한다. 이런 예측값은 바로 앞의 기준시간의 한 단계 앞선 예측값과 관계가 있기 때문에, $z_2(1)$ 은 $z_1(2)$ 와 결과적으로는 같은 값을 예측한 것이 된다.

표 1. 기준시간, 선행시간, 실제적용 월간의 관계

기준시간(t)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1
실제적용 월	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
예측값 (1994년)	$Z_1(1)$	$Z_1(2)$ $Z_2(1)$	$Z_1(3)$ $Z_2(2)$ $Z_3(1)$	$Z_1(4)$ $Z_2(3)$ $Z_3(2)$ $Z_4(1)$	$Z_1(5)$ $Z_2(4)$ $Z_3(3)$ $Z_4(2)$	$Z_1(6)$ $Z_2(5)$ $Z_3(4)$ $Z_4(3)$	$Z_1(7)$ $Z_2(6)$ $Z_3(5)$ $Z_4(4)$	$Z_1(8)$ $Z_2(7)$ $Z_3(6)$ $Z_4(5)$	$Z_1(9)$ $Z_2(8)$ $Z_3(7)$ $Z_4(6)$	$Z_1(10)$ $Z_2(9)$ $Z_3(8)$ $Z_4(7)$	$Z_1(11)$ $Z_2(10)$ $Z_3(9)$ $Z_4(8)$	$Z_1(12)$ $Z_2(11)$ $Z_3(10)$ $Z_4(9)$
예측값 (1995년)	$Z_2(12)$ $Z_3(11)$ $Z_4(10)$	$Z_3(12)$ $Z_4(11)$	$Z_4(12)$									

3.2 동적계획법

본 연구에 사용한 동적계획법은 정창삼(1998)이 사용한 모형과 기본적인 형태는 일치하지만, 다음과 같은 사항들을 추가하거나 개선하였다.

유입량자료는 기준시간이 1993년 12월에서 1996년 11월까지의 36개를 사용해서 각각의 경우에 선행시간이 12인 곳까지 예측한 자료를 유입량 자료로 사용했다.

수도권을 포함하는 유역의 용수수요량으로 실제로 팔당댐의 상·하류부에서 취수되고 있는 양을 적용했다.

표 2. 팔당댐의 광역상수도 취수량(MCM)

광역 상수도 취수량	연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
	1994	134.46	121.20	136.87	136.60	141.15	140.23	151.60	146.51	137.12	139.28	131.67	134.46
1995	131.51	114.91	126.96	124.42	133.12	133.75	138.74	143.29	131.67	133.12	126.23	130.17	
1996	128.83	120.48	128.30	125.97	131.51	130.38	139.28	142.22	133.75	135.53	131.93	137.13	
1997	136.06	123.14	135.79	133.75	139.28	138.15	145.17	143.03	131.16	133.92	131.41	132.05	

지류유입량은 수력발전소 운용자료집(한국전력공사, 1998)의 자료를 이용해서 홍천강과 남한강의 지류유입량을 계산했다.

표 3. 지류유입량(MCM)

	연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
홍천강	1994	4.02	2.14	4.82	114.90	65.09	32.94	227.93	176.77	103.12	169.54	23.84	9.11
	1995	-16.07	-10.71	45.53	50.89	37.50	24.11	575.86	1154.40	168.74	29.47	29.46	21.43
	1996	16.07	16.07	42.85	45.53	40.18	155.35	640.14	69.64	45.53	29.46	21.43	13.39
	1997	2.68	12.10	37.50	15.55	318.73	181.44	498.18	160.70	72.58	37.50	46.66	75.00
남한강	1994	74.87	58.30	104.39	58.02	125.20	47.77	811.79	934.32	322.85	525.26	186.75	142.10
	1995	102.01	66.01	130.58	275.43	246.24	136.88	1392.20	4117.60	837.14	74.24	103.65	59.59
	1996	65.36	37.81	168.91	134.81	61.59	366.85	1673.60	366.11	136.87	127.53	123.41	95.85
	1997	64.28	52.25	252.04	173.66	1001.10	1156.20	2532.90	1150.30	193.10	72.58	125.71	233.56

각댐의 초기 저수율은 1994년 1월부터 1997년 11월까지의 실제로 관측된 매달 1일의 값을 모형에 적용했고, 말기 저수율은 각 댐별로 화천댐은 1953년~1996년, 소양강댐은 1974년~1996년, 충주댐은 1986년~1996년까지의 값을 평균해서 사용했다. 원칙적으로는 각 댐의 월별 목표지류량을 적용하는 것이 바람직하지만, 자료를 구할 수 없어서 가장 합리적이라고 가정한 평균값을 적용했다.

4. 모형적용결과

4.1 유입량 예측

예측기법을 적용해서 구한 유입량은, AR(1)이라는 시계열 모형의 특성상 지체수가 1인 경우, 즉 일단계 선행예측값이 가장 잘 예측된 값이라고 할 수 있다. 표 4는 연도별로 일단계 선행 예측값과 실제 관측치의 합계, 그리고 1971~1993년간의 평균값을 나타낸 것이다.

표 4. 각 연도별 유입량 합계(cms)

연도	화천댐				소양강댐				충주댐			
	예측값 (A)	실제값 (B)	A-B	1971~1993년 평균값	예측값 (A)	실제값 (B)	A-B	1971~1993년 평균값	예측값 (A)	실제값 (B)	A-B	1971~1993년 평균값
1994년	826.75	644.90	181.85	1121.78	568.70	441.40	127.30	774.57	1477.11	1155.80	321.31	1919.59
1995년	734.56	1533.60	-799.04		546.60	1132.80	-586.20		1229.88	2119.50	-889.62	
1996년	982.25	964.50	17.75		630.67	545.50	85.17		1615.12	1035.40	579.72	

1994년 화천댐의 경우 일단계 선행예측값의 합계(A)가 실제 관측값(B)보다 더 많고, 소양강댐과 충주댐도 같은 경향을 보인다. 이것은 전체 수자원 시스템에서 사용할 수 있는 수자원 총량이 실제 관측값보다 많다는 것을 의미하고, 말기지류량의 값이 실측값과 비슷하다면, 결과적으로 발전량과 같은 시스템의 출력값이 실제 관측값보다 커지는 결과를 가져오게 된다. 하지만, 1995년은

반대로 실제 관측값이 일단계 선행예측값보다 큰 값을 나타낸다. 이것은 1995년 8월에 발생한 침 두치를 제대로 모의하지 못했기 때문에 나온 결과이며, 역시 발전량과 같은 출력값의 감소로 결과가 나타난다.

4.2 최적화 운영결과

유입량 예측기법을 이용한 확정론적 최적화 기법을 적용하면 예측된 유입량의 값이 기왕의 유입량보다 적을 경우, 전체 시스템의 결과값이 오히려 나빠질 수도 있다. 또한, 본 연구에 식용한 모형은, 초기 저수위는 실제의 관측값을 대입했지만, 말기 저수위는 각 댐별로 관측된 값들의 평균값을 의미하기 때문에 만약에 실제로 매달 초의 저수위 값이 평균값보다 작은 값에서 시작하게 되면, 말기 저수위를 맞추기 위해서 방류량을 감소시키게 된다

하지만, 반대로 예측된 유입량이 실제 관측값보다 큰 경우에는 반대의 현상이 벌어지게 된다. 이것은 전체 수자원 시스템 내에서 쓸 수 있는 수자원 총량이 늘어나서, 보다 효율적인 운영이 가능하기 때문이다. 표 5에 나타난 바와 같이 실제로 본 연구에서 수행한 결과값을 살펴보면 발전량의 경우 예측된 유입량이 실제 관측된 유입량보다 많은 1994년, 1996년은, 1996년도의 소양강댐의 발전량이 줄어든 것을 제외하고는 모두 발전량이 늘어난 것을 볼 수 있다.

1996년도의 소양강댐의 유입량이 실제 관측값보다 85.17(cms)만큼 많음에도 불구하고 발전량이 줄어든 것은 최적화 모형이 실제 관측값에서는 166.27(EI.m)인 말기 저류량 값을 모형에서 설정한 말기저류량의 평균값인 176.25(EI.m)로 맞추기 위해서 방류량을 감소시켰기 때문이다. 충주댐의 경우, 1996년의 유입량의 예측값과 실제값의 차이가 1994년의 차이보다 훨씬 크지만, 역시 121.72(EI.m)인 말기 저류량을 130.13(EI.m)로 맞추기 위해서 방류량을 감소시켰기 때문에 발전량의 증가가 많이 이루어지지 않았다.

표 5의 1994년~1996년도의 발전량 합계를 살펴보면, 화천댐, 소양강댐, 충주댐의 발전량이 모두 감소했다. 1995년의 경우, 발전량의 감소를 가지고 온 것은 8월달의 침두유입량을 제대로 모의하지 못한 결과이지만, 1996년도는 모형에서 설정한 12월의 말기저류량값이 실제 관측값보다 높기 때문에 방류량을 줄인 결과로 판단된다. 이런 발전량의 감소는 모형에서 구성한 목적함수의 최우선순위가 각 해당기간의 말기저류량 값을 맞추는 것에 있기 때문이다.

표 5. 각 연도별 발전량 합계(GWh)

연 도	화천댐			소양강댐			충주댐		
	예측값 (A)	실제값 (B)	A-B	예측값 (A)	실제값 (B)	A-B	예측값 (A)	실제값 (B)	A-B
1994년	247.60	197.20	50.40	335.10	275.64	59.46	493.80	419.03	74.77
1995년	224.10	323.10	-99.00	335.20	453.35	-118.15	487.50	649.11	-161.61
1996년	222.10	202.30	19.80	316.20	398.43	-82.23	405.10	396.85	8.25
합 계	693.80	722.60	-28.80	986.50	1127.42	-140.92	1386.40	1464.99	-78.59

5. 결론

한강수계내에 있는 댐군을 장기연계운영하기 위한 방법의 하나로서 유입량 예측기법과 확정론적 동적계획법을 적용하였다.

댐군을 실시간으로 연계운영하기 위해서는 월간, 주간, 일간이 상호 관련된 feedback이 이루어

지는 단계가 필요하지만, 본 논문에서는 월간만을 단위로 하는 장기연계운영의 경우를 대상으로 연구를 수행했다. 따라서, 홍수시와 같이 단기간에 발생할 수 있는 급격한 유입량의 증가에 대한 효과는 적절히 모의하기 힘들지만, 화천댐, 소양강댐, 충주댐의 1971년~1993년간 유입량 자료를 이용한 다변량 모형을 구성해서 유입량을 예측한 결과, 1995년 8월의 경우를 제외하고는 비교적 같은 경향을 가지는 자료를 얻을 수 있었다. 또한, 본 연구에서 구성한 모형의 출력값인 발전량은 각 해당기간의 유입량만이 아니라, 말기저류량값의 설정값에 의해서도 영향을 받는 것으로 나타났다.

기왕의 알고 있는 입력자료를 이용한 확정문직인 최적화 기법과는 달리, 유입량 예측기법을 이용한 최적화기법은, 각 계획기간의 목적함수 값을 최대화시키는 한 달 간의 계획을 수립할 수 있게 함으로 인해서 월간을 단위로 하는 댐 운영에 적용이 가능하다. 따라서, 각 계획기간별로 이루어지는 feedback을 포함시킨다면 실시간 운영기법으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 정창삼 (1998). 동적계획법을 이용한 한강수계 댐군의 장기 최적화 연계운영. 석사학위논문, 연세대학교.
- 한국전력공사 (1998). 수력발전소 운용자료집(1971~1997 실적).
- Hall, W.A., Harboe, R.C., Yeh, W.W-G., and Askew, A.J. (1969). Optimum Firm Power Output from a Two Reservoir System by Incremental Dynamic Programming, Contrib. 130, Water Resources Center, University of California, LosAngeles.
- Labadie, J.W. (1988). Dynamic Programming with the Microcomputer : Program CSUDP, User Manual, Water Resources Planning Management Program, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Co.
- Salas, J.D., Saada, N.M., Lane, W.L., and Frevert, D.K. (1996). Stochastic Analysis, Modeling, and Simulation (SAMS) Version 96.1 - User's Manual, Colorado State University, Fort Collins, Co.
- Trott, W.M. and Yeh, W.W-G. (1971). "Multi-level optimization of a reservoir system", Paper Presented at the Annual and National Environmental Engineering Meeting, ASCE. , St. Louis, Mo., Oct. 18-21.