

양해 추계학적 동적계획기법에 의한 저수지 운영률 개발

Development of Reservoir Operating Rule Using
Explicit Stochastic Dynamic Programming

고 석 구* · 이 광 만** · 이 한 구**

Ko, Seok-Ku · Lee, Gwang-Man · Lee, Han-Goo

Abstract

Operating rules, the basic principle of reservoir operation, are mostly developed from maximum or minimum, mean inflow series so that those rules cannot be used in practical operating situations to estimate the expected benefits or provide the operating policies for uncertainty conditions. Many operating rules based on the deterministic method that considers all operation variables including inflows as known variables can not reflect to uncertainties of inflow variations. Explicit operating rules can be developed for improving the weakness. In this method, stochastic trend of inflow series, one of the reservoir operation variables, can be directly applied to the model as a form of discrete transition probability. For improving the deterministic method, the stochastic technique was applied to develop reservoir operating rule. In this study, stochastic dynamic programming using the concepts was applied to develop optimal operating rule for the Chungju reservoir system. The developed operating rules are regarded as a practical usage because the operating policy is following up the basic concept of Lag-1 Markov except for flood season. This method can provide reservoir operating rule using the previous stage's inflow and the current stage's beginning storage when the current stage's inflow cannot be predicted properly.

요 지

저수지 운영의 기초가 되는 운영률은 대부분 과거기록 유입량중 최대 혹은 최소의 극한치 자료를 이용하거나 평균치 자료를 이용하여 도출하기 때문에 실제 운영에서 발생할 수 있는 불확실성에 대처한 기대편의 산정이나 운영 방안 수립에는 적절히 이용할 수 없다. 또한 지금까지 개발된 대부분의 운영률은 유입량을 포함하여 모든 운영변수를 이미 알고 있다는 확정론적 방법에 기초하고 있어 유입량의 불확실성을 반영하지 못하는 단점이 있다. 이를 개선할 수 있는 방법으로 추계학 분석기법에 의한 운영률을 개발할 수 있는데 이는 저수지 상태방정식의 구성요소인 유입량의 추계학적 특성을 시계열상에서 이산화된 천이확률로 처리하여 모형에 적용할 수 있다. 확정론적 방법에 의한 저수지 운영방안을 개선시키기 위하여 추계학적 방법에 의한 저수지 운영률을 개발하였다. 본 연구에서는 이와같은 방법론에 따른 양해 추계학적 동적계획기법을 이용하여 충주 저수지 시스템의 최적 운영 방안을 마련하였다. 개발된 운영률은 홍수기를 제외하고는 Lag-1 Markov 모형의 기본가정을 충실히 따르고 있어 저수지 운영률로의 이용이 가능하며, 운영단계의 유입량을 적절히 예측할 수 없는 현실에서 전단계의 유입량과 적용단계의 저류량만을 이용하는 저수지 운영률의 개발이 가능하다.

keywords : reservoir operation, stochastic dynamic programming, transition probability, uncertainty

* 한국수자원공사 낙동강사업본부장

** 한국수자원공사 조사계획처

1. 서론

다목적 저수지 운영률은 댐 건설 목적을 최적으로 달성시킬 수 있는 방안이 되어야 한다. 시스템으로부터의 기대편익을 증대시켜야 함은 물론 운영에 따른 신뢰도를 증대시킬 수 있어야 한다. 그러나 저수지 운영의 기본이 되는 유입량은 통제할 수 없는 추계학적 성질을 가지고 있어 장기적으로 예측한다는 것은 사실상 불가능하며, 이러한 불확실성에 대처하기 위하여 여러가지 저수지 운영방법이 개발되어 왔다.

저수지 운영률을 도출하는 방법은 크게 두 가지로 대별할 수 있다. 한가지 방법으로 유입량등 수문조건으로 대표되는 저수지 유입량의 추계학적 특성을 반영하기 위하여 장기간의 수문자료를 모형에 적용한 후, 적용결과를 저수지 운영의 기준이 되는 결정변수와의 상관성을 회귀분석이나 적합도 검증 등을 통하여 일반화된 운영률을 도출하는 방법이다. 다른 한가지 방법으로는 저수지 상태방정식의 구성요소인 유입량의 추계학적 특성을 시계열상에서 이산화된 천이확률로 처리하여 확률에 따른 기대값을 최대화 (또는 최소화) 할 수 있는 저수지 운영방안을 직접 구하는 방법이 있다.

전자의 경우를 음해법(implicit method)이라고 하며, 국내에서도 1991년부터 한국수자원공사에서 충주, 소양강, 주암 및 대청댐 등을 대상으로 개발하여 저수지 운영계획 수립에 이용하고 있다. 그러나 양해법(explicit method)이라고 하는 후자의 경우는 천이확률 작성을 위한 수문 추계학적 모형의 미비 등으로 추계학적 개념의 분석에 의한 운영률 등은 아직까지 이렇다 할 연구성과가 없는 실정이다. 특히, 저수지 운영 계획 수립에 있어 평균유입량에 근거한 확정론적 모형은 시스템으로부터의 편익이 과대 평가될 가능성과 비용이나 손실 등이 과소 평가될 수 있다는 지적이 있어 (Loucks 등, 1981) 추계학적 분석기법의 개발과 저수지 운영률 개발에 대한 노력이 이어져 왔다. 우리나라에서 확정론적 최적화 모형에 대한 개발 예는 1980년대 이후 활발히 진행되었는데 권오현(1980)이 북한강댐군의 최적 운영 방안을 마련하였고 이순탁과 이진우(1985)가 낙동강 유역의 4개 지역에 대한 용수 최적 배분 문제에 동적계획기법을 이용하였고 오영민과 이길성(1986)은 소양강 및 충주댐의 실시간 문제에 Min-Max 동적계획기법을 적용하였다. 고석구 등(1992)은 충주댐을 대상으로 음해법에 의해 개발된 운영률을 다기준 평가방법으로 분석하여 최적 운영률을

제시하였다. 외국의 저수지 운영 계획 수립에서 불확실성을 고려하기 위한 추계학적 분석 기법으로는 선형결정율(linear decision rule)을 이용한 기회계약기법(chance constrained programming: ReVelle 등, 1969), 추계학적 동적계획기법(Askew, 1974), Monte Carlo Technique(Askew 등, 1971; Willis 등, 1984) 및 신뢰성분석기법(reliability programming: Colorni와 Fronza, 1976) 등이 있다. 이러한 기법들 중에서 기회계약기법은 사용상의 편리성과 다른 최적화 기법들과 적용의 용이성 때문에 많이 사용되어 왔지만, 적용결과 실제보다 더 큰 저수용량이 요구되는 등 추계학적 분석기법으로는 적합치 않다는 일부 반론이 제기되고 있으며 (Hogan 등, 1981), 추계학적 동적계획기법은 천이확률 계산의 복잡성이나 계산시간 때문에 단일 저수지가 아닌 연계 저수지 운영에서는 그 실용성이 거의 불가능하다는 것이 단점으로 지적되고 있다.

본 연구에서는 충주댐을 대상으로 실제 적용이 가능한 추계학적 모형에 의한 저수지 운영률을 개발하였다. 장기간의 모의 발생된 유입량 자료를 이용하여 시계열상에서 Lag-1 형태의 이산화된 유입량별 천이확률을 구하여 양해 추계학적 동적계획기법(explicit stochastic dynamic programming)에 의한 충주 저수지 시스템 운영 개선을 위한 최적 운영률을 제시하고 있다. 그러나 우리나라의 강우특성상 하절기 저수지 운영률 개발은 쉽지 않으며, 역시 추계학적 방법에서도 천이확률이 강한 자기회귀성을 나타내고 있는 것 같지는 않다. 개발된 운영률을 검증하기 위하여 과거운영실적과 비교하였으며, 음해학적 방법에 의한 결과(이희승 등, 1992)와 비교하여 이용가능성을 평가하였다.

2. 저수지 시스템의 양해 추계학적 모형

2.1 양해 추계학적 동적계획기법 모형의 구성

저수지로 유입하는 유입량이 예측 불가능한 추계학적 과정을 따른다면 이와같은 추계학적 특성을 직접 고려할 수 있는 저수지 운영률은 확정론적인 방법에서 유입량을 처음부터 끝까지 알고서 답을 찾는 방법과는 달리 유입량의 확률분포와 직접 관련된 양해 추계학적 최적화 기법을 이용할 수 있다. 천이확률의 경우 앞 기간동안의 이산구간별 유입량을 조건으로 하는 어느 시점에서의 이산구간별 유입량간의 발생확률로 나타낼 수 있다. 최적 운영정책은 전기간의 기준유입량 구간을 조건으로 하는 어느 기간동안에 대한 이산화된 유입량 수준

에 따라 제시된 조건에 대한 최소 혹은 최대의 목적함수 값을 구하는 추계학적 동적계획기법에 이용될 수 있다.

즉, 유입량을 무작위변수로 간주할 때 어느시점에서 가능유입량을 차별화하여 전이 Matrix를 구성할 수 있다. 이는 연속적인 시간 운영에서 유입량은 완전히 독립적이라할 수 없으며, 시간에 따른 연속적인 유입량 계열은 종종 추계학적 동적계획기법 모형에서 Markov Process로 간주할 수 있다. 특히 1차 (first-order) Markov Process는 수문자료를 일정 기간으로 구분하여 정의할 때 어느시점의 유입량은 전적으로 바로 전단계의 유입량에 의존한다는 추계학적 과정으로 고려할 수 있다. 이와같은 이론에 근거한 추계학적 동적계획기법 저수지 운영모형에는 저류량을 차별화시킬뿐만 아니라 전단계 유입량을 조건으로 하는 현단계의 유입량 역시 차별화시켜 계산조합을 구성(Mays와 Tung, 1992) 하므로 Backward 순환 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_t(X_{t-1}, X_t) = \min_{U_t} \text{ (or } \max_{X_{t+1}}) \sum_{k=1}^K P_t(I_{tk} | I_{t-1}) [f_t(X_t, U_t, I_{tk}) + F_{t+1}(X_{t+1})] \quad (1)$$

여기서, $F_t(\cdot)$ 는 기간 t 의 함수최적치이며, $F_{t+1}(\cdot)$ 는 기간 1부터 $t-1$ 까지의 함수최적치이다. X_t 는 기간 t 의 초기 저류량, X_{t+1} 는 기간 t 의 말기 저류량, U_t 는 기간 t 의 저수지 방류량, I_{t-1} 는 $t-1$ 기간에 대한 기준 유입량이다. k 는 확률변수인 유입량의 이산값을 나타내는 지표이며, I_{tk} 는 이산 구간 k 에서 t 기간의 이산 확률 유입량, $P_t(I_{tk} | I_{t-1})$ 는 전 기간의 유입량(I_{t-1})을 조건으로 하는 현 단계의 차분 유입량(I_{tk})의 발생확률 그리고 $f_t(\cdot)$ 는 기간 t 동안의 용수공급량이나 발전에너지 등 목적함수 값을 나타내는 함수이다.

2.2 상태방정식과 전이확률

저수지 운영과 같은 추계학적 문제에 있어서는 추계학적 특성을 갖는 유입량이나 댐으로부터 생산되는 전력량 혹은 용수공급량 등을 확률변수로 처리해야하는데 일반적으로 유입량을 확률변수로 이용하고 있다. 최적의 방류량이나 저류량은 이들 확률 변수값에 따라 결정되기 때문이다. 저수지 운영기간 말기 저류량 혹은 방류량을 종속변수로 하는 상태방정식은 다음과 같이 쓸 수 있으며, 어떤 운영 단계(stage)의 말기 저류량은 그 운영 단계의 초기 저류량과 이 기간동안의 유입량 및 방류량의 함수임을 나타낸다.

$$X_{t+1} = g_t(X_t, U_t, I_t) \text{ or } U_t = g_t^{-1}(X_t, X_{t+1}, I_t), \text{ for } t = 1, \dots, T \quad (2)$$

여기서, t 단계의 운영 말기 저류량(X_{t+1})은 유입량(I_t)이 무작위 값을 갖는 한 확률변수로 취급할 수 있으며, 저수지 상태방정식에서 운영 말기 저류량을 종속변수로 하는 Non-Inverted 형이나 방류량을 종속변수로 하는 Inverted 형의 상태방정식에 포함된 유입량 (I_t)은 확률분포를 갖는 무작위변수 (random variable) 로써 특히 월별 유입량에 대한 발생확률은 지난 기간에 발생했던 값에 상관성을 갖고 있다고 할 수 있다. 이러한 상관성에 기초한 발생확률을 전이확률 (transition probability) 로 도출할 수 있는데 전월의 무작위 변수를 I 개의 이산구간으로 현단계를 K 개의 구간으로 나눌 수 있다면, 각각의 운영단계에서 이산구간에 대응하는 발생확률은 다음과 같이 전이확률 Matrix로 나타낼 수 있으며, 각각의 운영단계에서 유입량 이산구간에 대한 누가확률값은 1이라는 확률조건을 만족해야 한다.

$$P_t = [p_{i,k}], \text{ for } t=1, \dots, T; I=1, \dots, I; k=1, \dots, K \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K P_t(I_{tk}) = 1, \text{ for } t = 1, \dots, T \quad (4)$$

여기서, $i = 1, \dots, I$ 은 $t-1$ 단계에서의 확률변수에 대한 이산구간을, $k = 1, \dots, K$ 는 t 단계의 이산구간을 나타낸다. 따라서 $t-1$ 단계에서 t 단계로의 확률값이 어느 정도의 상관성을 가지고 있다면, 식 (1)에서의 전이확률은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{k=1}^K P_t(I_{tk} | I_{t-1}) = 1, \text{ for all discrete } I_{t-1}; \text{ for } t = 1, \dots, T \quad (5)$$

여기서, 식 (5)의 전이확률은 $t-1$ 단계의 주어진 유입량 이산구간에 대한 t 단계에서의 각각의 유입량 이산구간에 대한 발생확률의 합을 나타낸 것으로 각각의 단계에서 이산구간 유입량의 누가확률은 식(4)를 만족시키는 조건으로 구할 수 있다.

2.3 전이확률의 계산

추계학적 분석기법에 의해서 도출된 저수지 운영 Rule Curve 등 운영률을 실제 문제에 적용하여 시스템으로부터의 기대편익을 증대시키기 위해서는 확률변수인 유입량자료의 신뢰성이나 관측기간이 가장 중요하다고 볼 수 있다.

Table 1. Representative Inflows according to Discrete Inflow Intervals by Cumulative Probability
Unit : MCM

Month	Cumulative Probability (%)										
	0.00	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00	90.00	100.00
Jan	3.3	16.1	32.0	46.5	60.4	75.1	92.3	112.1	136.4	180.1	482.5
Feb	3.8	14.4	28.2	42.5	55.1	68.8	84.2	102.8	127.9	165.3	464.4
Mar	9.3	33.3	74.4	115.0	155.8	200.5	249.6	308.8	393.2	509.5	1602.1
Apr	18.4	151.5	241.3	315.5	392.7	472.6	559.7	657.1	790.9	984.4	2219.5
May	14.1	72.5	132.7	189.7	239.2	294.4	357.1	428.5	523.1	672.3	1941.2
Jun	7.9	44.5	93.2	145.0	197.1	251.2	312.6	392.5	490.7	639.7	1529.2
Jly	31.6	426.4	720.7	966.5	1186.9	1439.8	1700.0	2010.8	2400.2	3066.3	7319.5
Aug	25.2	223.0	381.3	531.3	675.9	831.3	1000.0	1191.9	1433.8	1810.1	4205.4
Sep	19.5	146.0	277.7	387.0	503.3	623.0	763.8	921.1	1133.4	1438.2	3886.3
Oct	10.2	60.9	99.1	134.2	168.6	202.9	238.1	281.4	337.6	422.1	987.1
Nov	7.2	40.9	68.7	88.6	111.2	133.9	158.7	186.6	222.1	284.2	647.3
Dec	3.9	27.6	48.1	65.8	84.8	105.1	125.5	151.7	183.4	228.3	631.8

Table 2. Transition Probability of May Conditioned on Average Inflow of April by Discrete Intervals

May	April	Average Inflow of April by Discrete Interval (MCM)									
		21.3	53.8	94.7	135.4	178.1	225.1	279.2	351.0	451.4	1055.8
Discrete inflow	84.9	.2024	.1365	.1215	.1180	.0884	.0837	.0740	.0820	.0480	.0439
	196.4	.1743	.1466	.1295	.1080	.0984	.0817	.0660	.0640	.0820	.0499
	278.4	.1082	.0884	.1275	.1280	.1084	.1076	.0940	.0880	.0980	.0519
	354.1	.1142	.1104	.1235	.1020	.1124	.0936	.0860	.0820	.0940	.0818
	432.7	.1102	.1124	.0936	.1180	.0984	.0916	.0920	.0920	.1060	.0858
	516.2	.0842	.0984	.0896	.0900	.0924	.1016	.1200	.1020	.1240	.0978
	608.4	.0701	.0964	.1016	.1040	.0984	.1096	.1160	.1120	.0840	.1038
	724.0	.0601	.0863	.0637	.0800	.0904	.1195	.1260	.1220	.1140	.1417
	887.7	.0401	.0763	.0757	.0760	.1145	.1135	.1040	.1200	.1300	.1497
	1601.9	.0361	.0482	.0737	.0760	.0984	.0976	.1220	.1360	.1200	.1936

Table 3. Transition Probability of August Conditioned on Average Inflow of July by Discrete Intervals

August	July	Average Inflow of July by Discrete Interval (MCM)									
		124.1	302.1	456.3	603.6	753.6	915.7	1095.9	1312.9	1621.9	3007.8
Discrete inflow	82.8	.2349	.1756	.1240	.1000	.0960	.0560	.0820	.0580	.0460	.0259
	211.9	.1827	.1297	.1100	.1120	.1060	.0920	.0900	.0760	.0640	.0379
	332.4	.1004	.1058	.1340	.1280	.1040	.1280	.0840	.0780	.0900	.0479
	445.1	.1205	.1218	.1220	.0920	.1200	.0680	.1020	.0920	.0980	.0639
	563.2	.0924	.0838	.1020	.0960	.1060	.1500	.0920	.1000	.1140	.0619
	693.4	.0622	.1238	.1040	.1100	.1000	.1160	.0940	.1160	.1000	.0739
	842.4	.0763	.0818	.1000	.1000	.0920	.1020	.1280	.1220	.1000	.0998
	1027.3	.0602	.0858	.0760	.1040	.0880	.1020	.1080	.1000	.1180	.1577
	1285.8	.0361	.0619	.0720	.0840	.1200	.1020	.1120	.1080	.1420	.1617
	2662.3	.0341	.0299	.0560	.0740	.0680	.0840	.1080	.1500	.1280	.2695

앞에서 언급한 식 (5)로 나타낸 유입량자료의 각 기간별 천이확률을 산정하기 위해서는 이산화된 누가 확률에 따라 각 단계의 확률변수인 유입량 자료에 대한 기대값을 우선 산정하여야 한다. 이를위해 추계학적 모형이 First-Order Markov Process 이지만 유입량이 저수지 운영에 미치는 지체 (lag) 효과를 고려하고 하절기 수문사상의 무작위성을 고려하여 자기회귀 AR(3) 모형과 자기회귀-이동평균 모형인 ARMA(3,3)을 이용하였다. 천이확률 분석은 61년간의 과거 기록 자료를 가지고 있는 충주 다목적댐의 월별 유입량 자료를 이용하여 5,000년간의 유입량 자료를 이용하였다. 이들중 과거 기록치와 가장 유사한 통계특성을 보이는 ARMA(1,1)에 의해 발생된 자료를 대상으로 각각의 월에 따라 크기별로 분류한 후 산정된 누가 확률에 따른 월별 확률기대값을 Table 1과 같이 구하였다. 천이확률을 산정하기 위해서는 앞 단계에서 산정한 누가 확률에 따른 이산화된 각 기간별 확률유입량의 각구간별 천이확률은 해당기간의 이산화된 각 기간별 확률유입량과 전 기간의 확률유입량에 상응하는 유입량의 빈도수를 총 자료수로 나누어 산정하였다. Table 2 및 3은 충주댐의 4월과 7월 유입량의 수문조건에 따른 5월과 8월 유입량간의 천이확률을 나타낸 것이고 Fig. 1 및 2는 이들을 등확률선으로 나타낸 것이다. Table 2 및 3과 Fig. 1 및 2를 유추하여 알 수 있듯이 매끄러운 등확률선이 되기 위해서는 신뢰성 있는 많은 자료의 분석이 요구된다. 충주댐의 천이확률을 산정한바 각 월별 확률유입량을 10개 구간으로 이산화할 경우 유입량 자료는 1,000년에서 10,000년 정도의 자료가 요구되었으며, 이를 위해서는 과거 관측기록도 최소한 50년 정도의 자료가 필요할 것으로 판단된다.

3. 양해 추계학적 동적계획기법의 적용 :충주댐

3.1 모형의 구성

양해 추계학적 동적계획기법을 적용한 저수지 운영률 개발은 우리나라 최대규모댐인 충주댐을 대상으로 이루어졌다. 적용 대상인 충주댐은 남한강에 위치하고 있으며, 연평균 유입량이 $5,277.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 수자원이 매우 풍부한 댐으로서 본댐에 100,000 kW급 4기 및 조정지댐에 6,000 kW급 2기의 수력발전기가 설치되어 있으며, 용수공급, 홍수조절, 갈수량 증대 및 저수지 주운 등을 주요 운영목적으로 하고 있다. 저수지 운영의 기초가 되는 체계도는 Fig. 3와 같고, 모형에서는 충주본 댐만을 상태변수로 하는 단일 저수지 운영으로 하였

ISO-Probability(March:X vs. April:Y)

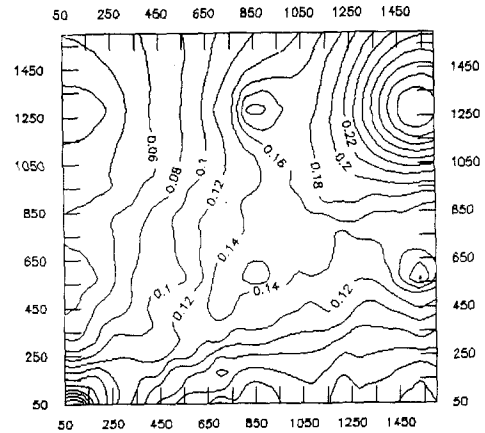


Fig. 1. Transitional Iso-Probability Line

ISO-Probability(July:X vs. August:Y)

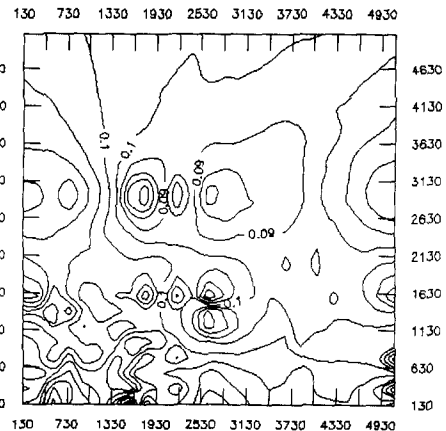


Fig. 2. Transitional Iso-Probability Line between July and August

으며, 역조정지댐은 Flow-through-reservoir로 간주하여 발전량 및 달천 유입량 등을 고려한 용수공급량 산정을 위하여 질량보존만을 고려하였다. 추계학적 동적계획기법의 적용을 위한 모형의 구성에 있어 충주댐의 현 운영여건에 따라 이수관리를 위한 목적함수는 다목적 분석기법중의 하나인 가중치 기법(weighting method: Zadeh, 1963)을 이용하여 평가하였다. 분석을 위한 최적 운영 모형에서는 저수지의 제반 제약조건을 만족시키면서 댐하류에서 용수수요량을 가급적 최대한 충족시키며, 기간중 전력생산량을 극대화시킬 수 있도록 다음과 같이 구성하였다.

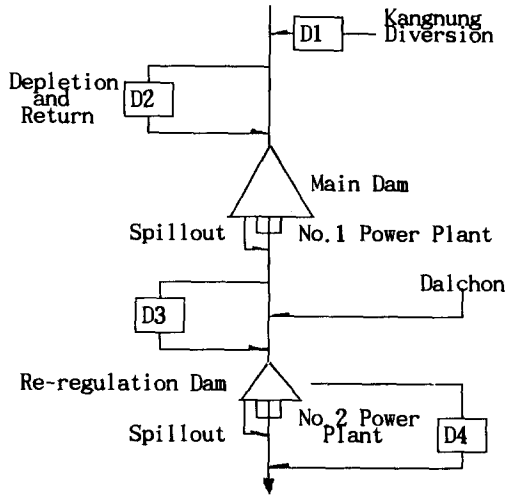


Fig. 3. Schematic Representation of the Chungju Reservoir System

목적함수:

$$F = \max \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{k=1}^K P_t (I_{tk} | I_{t-1}) (\omega_1 F_1 + \omega_2 F_2) \right\} \quad (6)$$

$$F_1 = C \cdot \rho_t \cdot U_t \cdot h_{et} \quad (7)$$

$$F_2 = - (S_{wt})_2 \quad (8)$$

$$S_{wt} = T_{wt} - U_t$$

$$S_{wt} = 0.0 \quad \text{for} \quad S_{wt} \leq 0.0$$

상태방정식 및 제약조건:

$$X_{t+1} = X_t + I_t - U_t - E_t(X_t, X_{t+1}) - D_t, \quad \text{for } t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$X_{t \min} \leq X_t \leq X_{t \max}, \quad \text{for } t=1, \dots, T+1 \quad (10)$$

$$U_{t \min} \leq U_t \leq U_{t \max}, \quad \text{for } t=1, \dots, T \quad (11)$$

여기서, F 는 다목적 평가함수로서 전 운영기간에 걸쳐 차분된 유입량의 발생확률에 대한 시스템으로부터 반응의 합으로 평가되며, F_1 는 발전에너지 최대화를 위한 목적함수 그리고 F_2 는 용수부족 최소화를 위한 목적함수이다. ω_1 및 ω_2 는 다목적 함수의 각각의 함수치 크기를 조절하기 위한 가중치이다. T_{wt} 는 하류에서의 용수공급 목표량, S_{wt} 는 용수공급 부족량을 나타내며, D_t 는 t 기간 동안 저수지에서 직접 취수하는 도수량, $E_t(\cdot)$ 는 기간 t 동안의 저수지 증발률으로써 저류량의 함수이다. C 는 단위변환계수이며, ρ_t 는 터빈 및 발전기 합성효율 그리고 h_{et} 는 유효수두이다. $P(\cdot)$ 는 식(5)에서 정의된 바와 같이 기간 $t-1$ 의 유입량(I_{t-1})을 조건으로

하는 기간 t 의 무작위 변수인 유입량(I_{tk})가 발생할 확률이다. 추계학적 동적계획기법에서는 모형설계에 있어 컴퓨터의 처리시간과 기억용량의 한계로 수행 가능한 시계열 분석기간이 제한을 받을 수 있다. 따라서 일반적인 성과로 간주되는 결과도 한정된 기간의 수문조건의 변동성을 분석하여 얻어진 것이기 때문에 광범위한 수문조건하에서 저수지 운영방안을 수립하거나 운영을 수행하기 위한 법칙을 도출하는데는 한계가 있다.

이와같은 점을 고려하여 본 연구에서는 충주댐을 대상으로한 운영를 개발을 위해 추계학적 유입량 조건에 따라 보다 효율적으로 대처할 수 있는 저수지 운영정책 제시가 가능하도록 전기간의 유입량을 조건으로 어느 시점에서의 유입량에 대한 이산화된 천이확률 行列式을 3년간 월별 정상성(stationary) 계열로 구성하여 모의하였으며, 월별로 총 36개의 계산단계중 종간의 1년 분만을 분석대상으로 하여 초기 및 말기조건의 저류량 효과를 최소화하였다.

위의 최적화 모형은 추계학적 동적계획기법의수행이 가능한 CSUDP (Labadie, 1990)에 의거 수행하였으며, 상태방정식은 Non-Inverted 형으로 하여 운영 시작 시점인 첫번째 단계의 저류량과 운영 말기 시점인 36단계의 저류량을 과거운영 기록자료중 12월말 평균 저류량인 2,000 MCM의 조건으로 수행하였다.

3.2 유입량 조건별 최적 저수지 운영 방안

위와같은 방법론으로 얻어진 저수지 운영률은 상태 방정식을 Non-Inverted 형으로 사용했기 때문에 월 초 저류량을 기준으로 월말 저류량을 결정하는 형태로써 Fig. 4 및 5에서는 갈수기를 대표하는 5월과 홍수기를 대표하는 8월에 대해 Table 1에서 제시된 10개의 유입량 이산화 구간중 6개 계열만에 대하여 보여주고 있다.

위의 결과에서 알 수 있듯이 유입량 조건별 채적선이 갈수기를 대표할 수 있는 5월의 경우 각이산구간 유입량별로 초기 저류량이 증가함에 따라 월말 저류량이 선형적으로 증가하고 있으며, 이산구간별 평균 유입량에 따라 동일한 형태로 편차가 좁게 형성된 일정한 구간으로 나타나고 있다. 한편, 홍수기를 대표할 수 있는 8월의 경우 이산구간 유입량에 대하여 월초 저류량과 월말 저류량의 관계가 하나의 선형 조합된 형태로 나타나고 있다. 이와같은 결과는 운영기간을 갈수기와 홍수기로 나누었을때 전기간에 걸쳐 거의 동일한 현상을 보여주고 있다. 따라서 개발된 운영률에 의한 모의 저수지 운

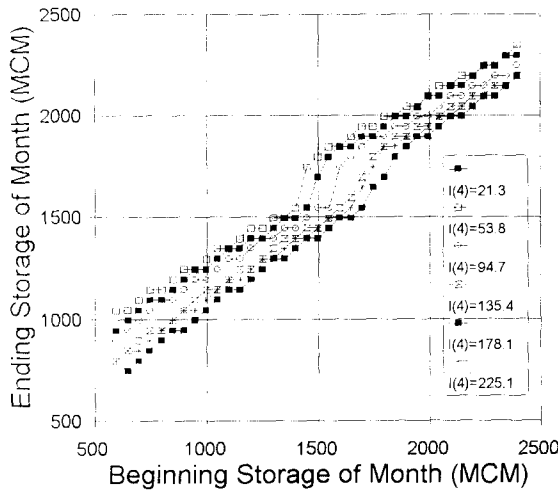


Fig. 4. Reservoir Operating Rules for May

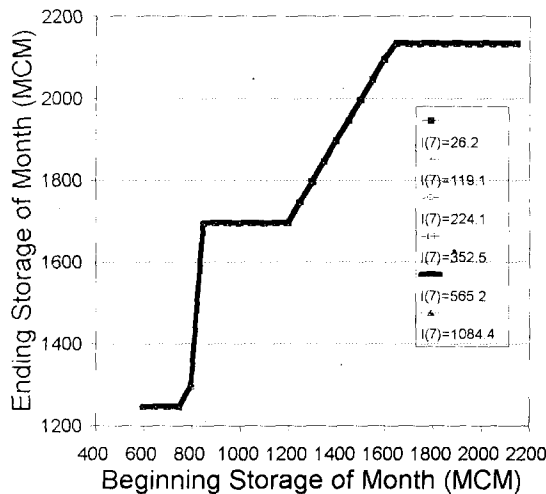


Fig. 5. Reservoir Operating Rules for August

영모형을 만들 수 있는데 각 이산구간 유입량별 운영률의 변곡점을 기준으로 월초 저류량에 대한 월말 저류량은 다음과 같은 직선형태의 선형방정식으로 나타낼 수 있다.

$$X_{t+1} = a \cdot X_t + b \quad (12)$$

여기서, X_{t+1} 는 운영기간 t 의 말기 저류량, X_t 는 운영기간 t 의 초기 저류량, a 및 b 는 회귀상수이며, Table 4 및 5에서 5월과 8월의 각 이산 유입량 구간별 저수지 운영률을 보여주고 있다.

3.3 운영률 이행도 분석

이와같이 개발된 운영률을 검증하기 위하여 CHJUSIM (Chungju Reservoir Simulation Model)을 개발하였다. 이 모형에서는 앞에서 제시된 운영률에서와 같이 월초 저류량을 기준으로 전월 유입량을 이산구간별로 확인하여 월말 저류량을 결정하고 각월의 방류량은 질량보존에 입각하여 다음과 같은 식으로 구하였다.

$$U_t = X_t - X_{t+1} + I_t - E_t(X_t, X_{t+1}) - D_t \quad (13)$$

위와같은 개념으로 개발된 모의 운영 모형을 검증하기 위하여 실제 저수지 운영기간에 해당하는 1986년부터 1992년까지 7년간의 저수지 유입량 자료를 이용하고, 충주댐 2001년 용수공급 목표량인 $3,380 \times 10^6 \text{ m}^3$ 을월별로 균등배분하여 모의운영을 실시하였으며, 운영 결과는 Table 6과 같다.

이때 모의결과, 홍수기 운영률이 Fig. 5에서 보여주듯이 모든 유입량 구간에서 같은 운영률이 적용되고 있어 실제 무작위 특성이 큰 수문사상이 저수지 운영에 미치는 영향을 반영하지 못하고 있어 7, 8 및 9월에 대하여는 음해학적 운영률을 추가하여 보완하였다.

Table 6에서는 모의된 결과와 과거운영 실적을 발전 및 용수공급 측면에서 이행도를 비교한 것으로 대체로 양해학적 기법이 음해학적 기법에 비하여 다소 열등한 결과를 보여주고 있으나 확정론적 방법이 저수지 운영 정보를 전기간에 걸쳐 완전히 안다는 가정하에서 운영률을 개발하는 음해학적 기법의 특징을 고려할때 유입량 조건을 Lag-1 Markov에 기초한 천이확률로 처리하여 확률변수에 대응하는 저수지 운영방안을 제시하는 양해학적 방법도 저수지 운영방안 결정 방법으로 이용할 수 있음을 보여준다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 홍수기에 대하여 양해학적 동적계획기법을 이용하여 운영률을 개발하는데는 아직 해결해야할 문제점이 남아있다. 이는 음해학적 기법에서도 마찬가지이며, 유입량 예측 기술을 향상시킴으로써 해결할 수 있는 문제이다. 그러나 현재로서는 자연현상을 완벽하게 모형으로 표현할 수 없는 현실을 감안하여 기 개발된 각종의 운영방안을 상호 보완적으로 이용하는 방법의 개발이 필요하다. 경우에 따라서는 경험에 바탕을 둔 인위적인 저수지 운영방안의 개발도 저수지 운영관리의 효율을 증대시키는데 이용될 수 있을 것이다.

Table 4. Regression Coefficients of Reservoir Operating Rules for May

Inflow (MCM)	X_t Interval (MCM)	a	b	R^2
$0 \leq I_t < 72$	$596 < X_t$	0.83371	205.6	0.993
$72 \leq I_t < 132$	$596 < X_t \leq 1400$	0.64460	651.0	0.991
	$1400 < X_t \leq 1600$	0.70000	743.8	0.890
	$1600 < X_t$	0.56911	961.4	0.988
$132 \leq I_t < 189$	$596 < X_t \leq 1540$	0.67142	534.4	0.990
	$1540 < X_t \leq 1800$	0.80000	479.2	0.941
	$1800 < X_t$	0.55944	901.0	0.980
$189 \leq I_t < 239$	$596 < X_t \leq 1650$	0.73066	386.0	0.994
	$1650 < X_t \leq 1870$	1.00000	30.0	0.892
	$1870 < X_t$	0.55757	855.5	0.971
$239 \leq I_t < 294$	$596 < X_t \leq 1440$	0.68008	571.0	0.990
	$1440 < X_t \leq 1560$	1.50000	-539.6	0.964
	$1560 < X_t$	0.61617	841.3	0.989
$294 \leq I_t < 357$	$596 < X_t \leq 1600$	0.71948	376.4	0.994
	$1600 < X_t \leq 1800$	2.00000	-1746.0	1.000
	$1800 < X_t$	0.62587	697.6	0.984
$357 \leq I_t < 428$	$596 < X_t \leq 1740$	0.75098	315.0	0.995
	$1740 < X_t \leq 1840$	2.00000	-1829.3	0.923
	$1840 < X_t$	0.64545	633.5	0.980
$428 \leq I_t < 523$	$596 < X_t$	0.84517	175.7	0.994
$523 \leq I_t < 672$	$596 < X_t \leq 1560$	0.71428	431.0	0.992
	$1560 < X_t \leq 1760$	2.10000	-1800.1	0.969
	$1760 < X_t$	0.56044	859.7	0.980
$672 \leq I_t$	$596 < X_t \leq 1450$	0.69556	513.6	0.991
	$1450 < X_t \leq 1650$	2.10000	-1615.6	0.969
	$1650 < X_t$	0.56428	901.4	0.986

Table 5. Regression Coefficients of Reservoir Operating Rules for August

Inflow (MCM)	X_t Interval (MCM)	a	b	R^2	X_{t+1}
$0 \leq I_t < 223$	$596 < X_t \leq 1200$	0.986	517.4	0.9995	1695
	$1200 < X_t \leq 1650$				1695
	$1650 < X_t$				1695
$223 \leq I_t < 381$	$596 < X_t \leq 800$	0.984	521.8	0.9993	1695
	$800 < X_t \leq 1200$				1700
	$1200 < X_t \leq 1650$				2140
	$1650 < X_t$				2140
$381 \leq I_t < 531$	$596 < X_t \leq 800$	0.984	521.8	0.9993	1695
	$800 < X_t \leq 1200$				1700
	$1200 < X_t \leq 1650$				2140
	$1650 < X_t$				2140
$531 \leq I_t < 675$	$596 < X_t \leq 800$	0.984	521.8	0.9993	1695
	$800 < X_t \leq 1200$				1700
	$1200 < X_t \leq 1650$				2140
	$1650 < X_t$				2140
$675 \leq I_t < 831$	$596 < X_t \leq 800$	0.984	521.8	0.9993	1695
	$800 < X_t \leq 1200$				1700
	$1200 < X_t \leq 1650$				2140
$831 \leq I_t < 1000$	$596 < X_t \leq 1200$	0.986	517.4	0.9995	1695
	$1200 < X_t \leq 1650$				2135
	$1650 < X_t$				2135
$1000 \leq I_t < 1191$	$596 < X_t \leq 1200$	0.986	517.4	0.9995	1695
	$1200 < X_t \leq 1650$				2135
	$1650 < X_t$				2135
$1191 \leq I_t < 1433$	$596 < X_t \leq 1200$	0.986	517.4	0.9995	1695
	$1200 < X_t \leq 1650$				2135
	$1650 < X_t$				2135
$1433 \leq I_t < 1810$	$596 < X_t \leq 800$	0.984	521.8	0.9993	1695
	$800 < X_t \leq 1200$				1700
	$1200 < X_t \leq 1650$				2140
	$1650 < X_t$				2140
$1810 \leq I_t$	$596 < X_t \leq 800$	0.984	521.8	0.9993	1695
	$800 < X_t \leq 1200$				1700
	$1200 < X_t \leq 1650$				2140
	$1650 < X_t$				2140

Table 6. Comparison of the Simulated and the Recorded

Classification	Historical	Implicit	Explicit
Mean Hydroenergy(GWh/Y)	783.46	838.80	847.20
90% Firm Energy(GWh/M)	23.37	21.89	17.93
90% Firm Water(MCM/M)	141.90	137.16	119.40
90% Firm Power(MW/M)	-	198.77	171.26
Water Shortage(MCM/Y)	-	301.20	306.00
Max Waterfall(MCM/M)	-	237.50	235.80

4. 결 론

일반적으로 저수지에 유입되는 유입량은 예측하기 어려운 임의성의 추계학적 요소가 많이 포함되어 있어서 확정론적인 방법에 의한 저수지 운영문제의 최적해를 실제 운영에 직접 적용하는 것은 매우 불합리 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 보완하여 과거에 관측된 저수지 유입량 자료를 이용하여 추계학적 수문모형을 이용, 천이확률을 구하여 누가 확률별로 구분된 구간 유입량 자료에 의한 천이확률을 저수지의 추계학적 동적계획기법에 이용하여 저수지 운영률을 도출하는 방법론을 적용하였다.

계산된 천이확률중 홍수기인 7, 8, 9월의 Lag-1 이산구간별 빈도수에 의한 발생확률이 직관적인 판단으로는 어느정도로 상관성이 결여되어 있으나 나머지 달은 5월달의 저수지 운영률과 같이 만족할만한 결과를 보여주었다. 저수지 운영률은 계산된 천이확률을 통해 한강수계내 충주 저수지 시스템에 적용하여 최적 운영 결과에 따른 다목적 저수지의 월별 운영방안을 제시하고 적용결과로부터 본 기법에 의한 다목적 저수지의 이수관리 위한 시스템 운영률을 매 기간별 월초 저류량에 따른 월말 목표 저류량을 결정할 수 있게 되었다. 개발된 운영률중 홍수기의 운영률은 전단계의 이산구간 유입량의 크기에 관계없이 하나의 운영률 방정식으로 보여주고 있어 대부분의 갈수기 운영률과는 대조를 이룬다. 이는 홍수기 수문사상에 의한 특성으로서 전단계의 유입량값과 현단계에서의 천이확률의 상관성이 적음을 보여준다. 따라서 이부분에 대한 앞으로의 연구가 절실히 요구되며, 저수지 운영모형의 개발에 앞서 홍수기 수문사상을 보다 구체적으로 제시할 수 있는 방법론의 개발이 추가 연구과제로 요구된다. 또한 이렇게 개발된 운영률을 실제 저수지 시스템 운영에 이용할 수 있는 방법중 확정론적 동적계획기법에 의한 음해학적 저수지 운영률과 상호보완적으로 이용할 수 있는 방법론의 개발도 필요하다.

참 고 문 헌

고석구 (1992). 한강수계 충주저수지 시스템의실시간 최적 운영을 위한 의사결정 지원 시스템 개발, 한국수자원공사.
고석구, 이광만, 고익환 (1992). "다기준 의사분석기법에 의한 다목적 저수지의 운영률 평가." 한국수문학회지, 제25권, 제1호, pp.75-82.

권오현 (1980). "북한강 댐군의 최적 운영을 위한 시스템 모형의 개발." 대한토목학회논문집, 제28권, 제4호, pp. 95-104.
오영민, 이길성 (1986). "Min-max DP에 의한 소양 및 충주호의 홍수조절 운영." 한국수문학회지, 제19권, 제4호, pp. 339-344.
이순탁, 이진우 (1985). "동적계획기법에 의한 물배분." 한국수문학회지, 제18권, 제2호, pp. 163-174.
이희승, 심순보, 고석구 (1992). "신뢰도를 고려한 다목적 저수지의 월별 운영률." 한국수문학회지, 제25권, 제1호, pp. 75-82.
Askew, A.J. (1974). "Optimum reservoir operating policies and the imposition of a reliability constraint." *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 51-56.
Askew, A.J., Yeh, W.W.-G., and Hall, W.A. (1971). "Use of Monte Carlo techniques in the design and operation of a multipurpose reservoir system." *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 4, pp. 819-826.
Colorni, A., and Fronza, G. (1976). "Reservoir management via reliability programming." *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 1, pp. 85-88.
Hogen, A.J., Morris, J.G., and Thompson, H.E. (1981). "Decision problems under risk and chance constrained programming: dilemmas in the transition." *Manage Sci.*, Vol. 27, No. 6, pp. 698-716.
Labadie, J.W. (1990). *Dynamic programming with microcomputer: pogram CSUDP*. Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Co.
Loucks, D.P., Stedinger J.R., and Haith, D.A. (1981). *Water resources systems planning analysis*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
Mays, L.W., and Tung, Y.-K. (1992). *Hy-drosy stems engineering and management*. McGraw-Hill, Inc.
ReVelle, C, Joeres, E., and Kirby W. (1969). "The linear decision rule in reservoir

- management and decision : 1. Development of the stochastic model." *Water Resources Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 767-777.
- Willis, R., Finney, B.A., and Chu, W.-S. (1984). "Monte Carlo optimization for reservoir operation." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 9, pp. 1177-1182.
- Zadeh, L.A. (1963). "Optimality and non-scalar-valued performance criteria." *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-8, No. 1, pp. 59-60.
- 〈최종본 도착일 : 1997년 6월 7일〉