

## ENSO 정보를 이용한 저수지 운영율의 산출 Deriving a Reservoir Operating Rule Using ENSO Information

김 영 오\*  
Kim, Young-Oh

---

### Abstract

Analyzing monthly inflows of the Chung-Ju Dam associated with El Nino Southern Oscillation (ENSO), Kim and Lee(2000) reported that the fall and winter inflows in El Nino years tended to be low while those in La Nina years tended to be high. This study proposes a methodology of employing such a teleconnection between ENSO and inflow in reservoir operations. The ENSO information is used as a hydrologic state variable in stochastic dynamic programming (SDP) to derive a monthly optimal rule for operating the Chung-Ju Dam. An alternative operating rule is also derived with the SDP with no hydrologic state variable. Both of the SDP operating rules are simulated and compared to examine the value of using the ENSO information in operations of the Chung-Ju Dam. The simulation results show that the operating rule using the ENSO information increases energy generation and reliability of water supply as well as reduces spill.

*keywords* : ENSO, stochastic dynamic programming, hydrologic state variable, reservoir operations

---

### 요 지

Kim and Lee(2000)는 우리 나라 충주댐의 월 유입량을 El Nino Southern Oscillation (ENSO)과 연관지어 분석한 결과, 엘니뇨가 발생한 해의 가을과 겨울의 유입량은 평년보다 적은 반면, 라니냐가 발생한 해의 가을과 겨울의 유입량은 평년보다 많음을 밝힌바 있다. 본 연구에서는 이런 ENSO와 유입량 사이의 원격상관관계를 저수지 운영에 활용하는 방안을 제시하고자 한다. 즉, ENSO 정보를 추계동적계획법(SDP)의 수문상태변수로 사용하여 충주댐의 월 운영율을 산출하였다. 대안으로, 수문상태변수를 사용하지 않은 SDP로 월 운영율을 또한 산출하였다. 이러한 두 가지 운영율을 모의운영을 통하여 비교함으로써, ENSO 정보를 이용하였을 때의 가치를 검토하였다. 모의운영 결과, ENSO 정보를 이용한 운영율은 발전량과 용수공급의 안정성을 증대시키고 동시에 월유량을 감소시키는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : ENSO, 추계동적계획법, 수문상태변수, 저수지 운영

---

\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 전임강사

Senior Lecturer, School of Civil, Urban, Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea(E-mail : yokim05@snu.ac.kr)

## 1. 서 론

동태평양에서 발달하는 엘니뇨(El Nino)/라니냐(La Nina) 현상은 지구 곳곳에서 기상이변을 일으키는 주요 원인으로 지목되고 있다. 그러나 태평양 연안의 선진국에서 최근 수행된 연구들을 살펴보면, 엘니뇨/라니냐 현상과 강우-유출 현상 사이에 존재하는 원격상관관계(teleconnection)를 이용하여 장기 유량예측의 개선을 시도하고 있다(Piechota 등, 1997). 일례로 미국의 서북부 지역은 산간지역이므로 겨울동안 산 위에 쌓인 강설량을 분석하여 해빙기인 봄철 유량을 예측하는 방법을 전통적으로 사용하고 있으나, Hamlet 등(1999)은 겨울철 적설량과 더불어 엘니뇨/라니냐 현상을 나타내는 지표인 ENSO(El Nino Southern Oscillation)를 유량의 예측에 함께 이용하는 기법을 제안하였다. ENSO를 이용한 유량예측에 관한 대부분의 연구는 ENSO에 관한 정보를 이용하면 유량의 확률분포를 좀 더 정확히 추정할 수 있다는 결과를 보여주고 있다. 즉, 유량을 단일한 확률분포로 나타내는 대신, 엘니뇨 해, 라니냐 해, 그리고 평년 등의 세 가지 경우에 대한 조건부 확률로 나타낼 수 있음을 제시하였다. 이러한 확률예측의 개선은 궁극적으로 수자원시스템 운영의 개선으로 귀결되어야 하나, 대부분의 ENSO 관련 연구들은 선진국에서조차도 상관관계의 분석과 예측에 그치고 있으며 수자원시스템 운영방안으로의 응용은 진부한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 ENSO 정보를 수자원시스템인 저수지의 운영에 적용할 수 있는 일반적인 방안을 제안하고 우리나라에서 그 적용성을 살펴보았다.

저수지 운영을 위한 최적화 모형의 개발은 수자원 분야의 오랜 주제로, 선형계획법, 비선형계획법, 동적계획법 등의 최적화기법이 주류를 이룬다(Yeh, 1985). 저수지 운영은 통상 장기(long-term) 계획모형, 중(mid-term)·단기(short-term) 운영모형, 실시간(realtime) 운영모형 등으로 구분할 수 있다. 단기 또는 실시간 운영모형은 유입량을 상대적으로 정확하게 예측할 수 있으므로 확정론적(deterministic) 기법을 흔히 사용하나, 장기 계획모형이나 중기 운영모형은 유입량뿐만 아니라 용수와 발전 수요 등에 존재하는 불확실성을 다루기 위한 추계학적(stochastic) 기법을 사용함이 효과적이다. 본 연구에서는 저수지의 월 운영을 산출하기 위한 중기 운영모형으로 동적계획법을 사용하며, 이렇게 산출된 운영율은 단기 운영모형의 경

계조건으로 사용될 수 있다.

## 2. 수문상태변수를 포함한 추계동적계획법

추계동적계획법(Stochastic Dynamic Programming, SDP)은 목적함수와 제약조건이 선형이어야 한다는 제한이 없고 유입량 등에 존재하는 불확실성을 확률함수의 형태로 포함시킬 수 있다는 장점 때문에, 저수지 최적운영의 개발에 널리 사용되어온 최적화기법이다.

추계동적계획법은 다음의 순환식(recursive equation)을 연속적으로 풀어나가는 방법으로 최적방류량을 결정해 나간다(Tejada-Guibert 등, 1995):

$$f_{opt}^n(S_t, H_t) = E_{Q_t, H_t}[\max_{R_t}\{B_t(S_t, Q_t, R_t) + E_{H_{t+1}|H_t, Q_t}[f_{opt}^{n-1}(S_{t+1}, H_{t+1})]\}] \quad (1)$$

여기서,  $t$ 는 이산화된(discretized) 시간 (본 연구에서는 월(月), 즉  $t = 1, 2, \dots, 12$ 월),  $n$ 은  $t$ 월에서 최종단계인  $T$ 까지 남은 기간,  $S_t$ 는 저수상태변수로  $t$ 월의 초기 저수량,  $R_t$ 는  $t$ 월 동안의 방류량,  $Q_t$ 는  $t$ 월 동안의 저수지 유입량,  $H_t$ 는  $t$ 월에 해당하는 수문상태변수(hydrologic state variable),  $B_t(\cdot)$ 는  $t$ 월 동안 저수지 운영으로 발생한 편익함수,  $f_{opt}^n(\cdot)$ 는 잔여최적편익함수, 즉  $t$ 월부터 최종단계까지  $n$  기간동안 발생할 미래 총 기대편익을 나타내는 함수 등이다. 그러므로 결정변수인 방류량( $R_t$ )과 잔여최적편익함수( $f_{opt}^n$ )는 저수상태변수( $S_t$ )와 수문상태변수( $H_t$ )의 함수다. 즉,  $t$ 월 동안의 방류량을 결정하기 위해서  $t$ 월초에 저수위뿐 아니라  $t$ 월 동안 전개될 수문학적 상태를 고려할 수 있음을 의미한다.

SDP의 가장 간단한 형태로는 수문상태변수를 사용하지 않은 모형을 생각해볼 수 있으며, 이 경우 식 (1)은 다음과 같은 SDP-N 모형이 된다:

$$f_{opt}^n(S_t) = E_Q[\max_{R_t}\{B_t(S_t, Q_t, R_t) + f_{opt}^{n-1}(S_{t+1})\}] \quad (2)$$

SDP-N 모형의 특징은 방류량 결정을 위해 유입량의 무조건 확률(unconditional probability)을 이용한다는 점이다.

앞서 설명한 바와 같이 식 (1)에 나타난 SDP의 또 하나의 장점은 수문상태변수를 통하여 다양한 수문학적 정보(hydrologic information)를 포함할 수 있다

**표 1. 연속된 두 달의 수문상태변수의 선택에 따른 4가지 경우**

	t	no	$J_t$
t+1	no	Case1	Case2
	$J_{t-1}$	Case3	Case4

는 점이다. 수문상태변수로 가장 널리 사용되는 변수로는 지난달의 유입량( $Q_{t-1}$ )이며, 이는 연속된 두 달의 유입량의 자기상관(autocorrelation) 특성에 기초한 조건부 확률(conditional probability)을 방류량 결정에 이용하는 결과가 된다. 그러나 유입량 자료를 분석해 보면, 모든 달에 걸쳐 유입량의 자기상관계수가 높지는 않으며, 우리 나라의 경우 갈수기 중 몇 개월만이 유의한 수준의 자기상관계수를 보여주는 것이 일반적이다. 그러므로 자기상관계수가 높지 않은 달의 경우 다른 종류의 수문상태변수를 고려함이 더 적절할 수 있다. 예를 들어, 고석구 등(1997)은 충주댐에 SDP를 적용하였고 모든 달에 있어 수문상태변수로 전 달(月)의 유입량을 사용하였으나, 충주댐의 경우 일년 중 6개월 이상에 걸쳐 자기상관계수가 0.5 이하라는 점을 감안하면 개선의 여지가 있다(표 3 참조).

ENSO가 유입량에 영향을 미치는 경우 ENSO 정보도 SDP의 수문상태변수로 사용될 수 있으며, 본 연구에서는 이를 SDP-E모형으로 부르기로 한다. 그러나 ENSO의 영향이 일년 중 몇 개월에만 유효한 경우 그 기간에만 ENSO 수문상태변수를 사용함이 타당하다. 이 경우 이번 달과 다음 달에 선택된 수문상태변수에 따라 식(1)은 표 1과 같이 4가지 경우로 구분되며, 그에 따른 SDP-E 순환식의 형태는 표 2와 같다.

표 2에서  $J_t$ 는 ENSO를 나타내는 지표로 엘니뇨(El), 라니냐(La), 그리고 평년(Ne)의 3가지 경우 중

한가지로 표시된다. 식(2)의 SDP-N에서는 유입량의 무조건 확률만을 고려하였지만, 표 2의 Case2와 Case4에서는 ENSO 정보가 주어지면  $E_{Q_t}$ 를 통해 3가지의 상이한 조건부 확률(즉  $\Pr\{Q_t^i | J_t = El\}$ ,  $\Pr\{Q_t^i | J_t = La\}$ ,  $\Pr\{Q_t^i | J_t = Ne\}$ )을 고려할 수 있다는 특징이 있다. 표 2의 Case4에서  $E_{J_{t+1}, Q_t} = 1$ 인 이유는 ENSO는 매 달 그 패턴이 달라지지 않고 수개월 동안 지속되므로, 어느 달이 El Nino로 주어지면 (즉,  $J_t = El$ ) 다음 달도 El Nino (즉,  $J_{t+1} = El$ )로 확정되기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 Case3과 같이 ENSO 정보를 1년에 한 번 갱신할 수 있도록 설정하였으며, 이 경우  $J_t$ 와  $Q_t$ 에 상관없이  $J_{t+1}$ 가 일어난다고 가정하여  $E_{J_{t+1}, Q_t} = E_{J_{t+1}}$ 로 나타내었다.

### 3. 모형의 적용: 충주댐 월 운영율의 개발

#### 3.1 유역의 수문학적 특성

본 연구에서는 남한강 유역의 충주댐을 선정하여 위에서 제시된 SDP모형을 적용하여 보았다. 충주댐 유역의 연평균 강수량은 1,113mm 이며, 연평균 유입량은  $4,872 \times 10^6 m^3$ 이다. 충주댐의 유입량 자료는 다른 지점에 비해서 양호한 편으로 1956년부터 존재하며, 본 연구에서는 1997년까지의 자료를 이용하였다. 본 연구에서 사용된 유입량 자료는 수위 자료와 방류량 자료를 이용하여 역산한 자료로 저수지에서의 증발량, 강수량, 그리고 그 외 모든 손실을 모두 포함한 자료로 다목적댐 운영실무편람(1999)에 나타나 있다. 월 유입량 자료의 통계특성은 표 3에 나타나있는 바와 같이 전형적인 계절변동을 보여주고 있다. 각 달의 유입량은 대수정규분포로 가정하였으며, 그림1은 이 분포가

**표 2. 연속된 두 달의 수문상태변수의 선택에 따른 SDP-E 순환식의 형태**

	SDP-E 순환식
Case1	$f_{opt}^n(S_t) = E_Q[\max\{B_f(S_t, Q_t, R_t) + (f_{opt}^{n-1}(S_{t+1}))\}]$
Case2	$f_{opt}^n(S_t, I_t) = E_{Q_t, I_t}[\max\{B_f(S_t, Q_t, R_t) + (f_{opt}^{n-1}(S_{t+1}))\}]$
Case3	$f_{opt}^n(S_t) = E_Q[\max\{B_f(S_t, Q_t, R_t) + E_{J_{t+1}}(f_{opt}^{n-1}(S_{t+1}, I_{t+1}))\}]$
Case4	$f_{opt}^n(S_t, I_t) = E_{Q_t, I_t}[\max\{B_f(S_t, Q_t, R_t) + (f_{opt}^{n-1}(S_{t+1}, I_{t+1}))\}]$

표 3. 충주댐 월 유입량의 통계특성

단위 : 백만 m<sup>3</sup>

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
평균	82.0	84.0	239.0	513.0	339.0	353.0	1359.0	931.0	754.0	242.0	167.0	121.0
표준편차	37.2	76.0	195.2	362.3	206.1	363.0	734.3	576.7	651.0	188.3	93.8	60.6
변동계수	0.45	0.90	0.82	0.71	0.61	1.03	0.54	0.62	0.86	0.78	0.56	0.50
자기상관계수	0.85	0.53	0.31	0.15	0.52	0.17	0.25	-0.20	0.00	0.18	0.41	0.63

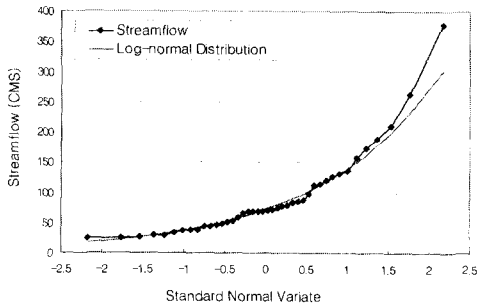


그림 1. 충주댐 월 유입량에 대한 대수정규분포의 적합성: 10월의 예

적절함을 일례로 보여주고 있다. 이를 x2 검정으로 1월부터 12월까지 검증한 결과, 유의수준 10%에서 7월만이 정규분포의 가설을 기각하나, 모형화 과정의 일관성을 위해 모든 달을 대수정규분포로 가정하였다.

Kim과 Lee(2000)는 ENSO와 충주댐의 월 유입량과의 관계를 복합분석(composite analysis)을 통해 연구한 결과, 엘리뇨가 발생한 해의 가을과 겨울의 유입량은 평년보다 적고, 반대로 라니냐가 발생한 해의 가을과 겨울의 유입량은 평년보다 많음을 통계적으로 검증하였다. Kim과 Lee(2000)는 엘리뇨 해와 라니냐 해를 정의하기 위해 Ropelewski와 Jones(1987)의 구분을 사용하였는데(표 4), 본 연구에서도 같은 방법으로 구분하였다. 표 4에 따르면 달력년을 기준으로 1956년부터 1997년까지 총 42년 동안 엘리뇨는 9년, 라니냐는 7년이 발생하였음을 알 수 있다. 물론 자료의 개수가 작지만, 엘리뇨 해와 라니냐 해의 유입량 평균을 각각 계산해 보면 평년(엘리뇨 해도 라니냐 해도 아닌 해)의 유입량 평균과 상당한 차이를 보이고 있는 기간이 있음을 알 수 있다(표 5). 본 연구에서는 이런 점에 착안하여, ENSO 정보로부터 유입량의 통계특성의 변화를 감지하고 이를 저수지 운영을 개발에

표 4. Ropelewski and Jones(1987)에 의한 엘리뇨 해와 라니냐 해의 구분

엘리뇨	라니냐
	1956
1957	
1963	
	1964
1965	
1969	
	1970
	1971
1972	
	1973
	1975
1977	
1982	
	1983 <sup>*1</sup>
1994	
1997	

\*1. Ropelewski and Jones(1987)는 1983년을 엘리뇨와 라니냐가 모두 발생한 해로 규정하였으나, 본 연구에서는 라니냐 해로 분류하였다.

이용하는 방안을 제시하고자 한다.

### 3.2 저수지 운영의 목적함수와 제약조건

다목적 저수지시스템의 운영에 있어서는 여러 개의 목적함수를 동시에 고려해야 한다. 본 연구에서는 충주댐에서의 저수지 운영에 있어 다음과 같이 세 가지의 목적을 고려하였다(한국수자원공사, 1991).

$F_1$  : 총 발전량

$F_2$  : 보장유하량(firm water supply)에 대한 부족량

$F_3$  : 보장발전량(firm power)에 대한 부족량

여러 가지 목적을 동시에 고려하는 다목적 분석기법

표 5. 엘리노 해, 라니냐 해, 평년의 유입량 평균의 비교

(단위 : 백만 m <sup>3</sup> )												
월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
평년	85.7	99.9	253.9	434.4	311.8	377.9	1314.3	958.9	838.5	266.0	174.4	117.0
엘리노	62.7	49.6	176.0	563.2	384.9	262.3	1361.2	972.8	345.0	173.0	149.0	131.2
라니냐	90.8	69.4	281.8	752.7	390.8	374.0	1447.4	715.9	990.9	247.5	157.6	118.4

(multi-objective analysis) 중 가장 보편적으로 사용되고 있는 가중치 방법(weighting method)을 통하여 세 가지 목적에 가중값을 부여하여 단일 목적함수의 형태로 다음과 같이 변환하였다.

$$F = (w_1F_1 - w_2F_2 - w_3F_3) = \sum_{i=1}^{12} B_i \quad (3)$$

여기서,  $w_1, w_2, w_3$  는 각 목적함수에 대한 가중값이며, 각각 1.0, 0.1, 0.01의 값이 사용되었다(한국수자원공사, 1991). 식 (3)의  $B_i$ 는 식 (1)에 사용된 편익함수  $B_i$ 와 동일하며, SDP는 단일 목적함수인  $F$ 를 최대화하기 위해 단계(Stage)별로 편익함수  $B_i$ 와 잔여 최대편익함수  $f_{opt}^{(n-1)}$ 를 이용하여 식 (1)을 반복적으로 풀어 나간다.

저수지 운영의 최적모형에서 고려해야 할 제약조건은 시스템의 상태방정식과 목적함수에 포함된 각 변수의 상한과 하한값을 나타내는 사항들이다. 본 연구에서 사용된 상태방정식은

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t \quad (4)$$

이며, 제약조건은

$$110m \leq L_t \leq 138m \quad (\text{홍수기: } t = 7, 8, 9\text{월}) \quad (5a)$$

$$110m \leq L_t \leq 141m \quad (\text{비홍수기}) \quad (5b)$$

$$R_t \leq 828 \text{ m}^3/\text{sec} \quad (5c)$$

여기서,  $L_t$ 는  $t$ 월의 저수지 수위를 나타내며, 총주댐의 저수량 수위 관계는 다음의 회귀식을 이용하였다(한국수자원공사, 1991).

$S_t \leq 1553 \times 10^6 \text{ m}^3$  일 때,

$$L_t = 0.4248661 \times 10^{-8} \times S_t^3 - 0.2113609 \times 10^{-4} \times S_t^2 + 0.05059570 \times S_t + 86.456 \quad (6a)$$

$1553 \times 10^6 \text{ m}^3 < S_t$  일 때,

$$L_t = 0.5125883 \times 10^{-9} \times S_t^3 - 0.5359386 \times 10^{-5} \times S_t^2 + 0.02829685 \times S_t + 97.046 \quad (6b)$$

### 3.3 SDP-E 모형의 확률 산정

본 연구에서는 수문상태변수를 전혀 사용하지 않은 SDP-N 모형과 ENSO 정보를 수문상태변수로 사용한 SDP-E 모형으로 각각 총주댐의 월 운영율을 개발하였다. 즉, SDP-E의 결과를 SDP-N의 결과에 비교함으로써 ENSO 정보를 사용한 경우 저수지 운영에 있어 어느 정도 개선을 가져오는지를 산정하여 ENSO 정보의 효용성을 살펴보고자 하였다.

식 (2)와 표 2의 순환방정식을 풀기 위해서는 통상 상태변수와 확률변수를 이산화한다. 본 연구에서는 저수상태변수를 30개로 나누었으며, 확률변수인 유입량은 3개로 나누었다. 저수상태변수의 분할은 Savarenskiy의 기법(Doran, 1975)을 사용하였으며, 확률변수의 분할은 Pegram 등(1991)의 기법을 따랐다. Pegram 등(1991)은 표준정규분포를 따르는 확률변수의 경우 연속확률분포를 3개, 5개, 7개의 대표값으로 나타내는 기법을 제시하였는데, 3개인 경우 대표 확률값과 확률변수의 이산값을 나타내면 표 6과 같다. 표 6의 표준정규분포 대표값( $z$ )에서 유입량 대표값( $q$ )을 계산하기 위해서는 각 달의 유입량을 대수정규분포로 가정했기 때문에 다음의 변환이 필요하다.

$$q = \exp[z \cdot s_y + \bar{y}] \quad (7)$$

여기서,  $\bar{y}$  와  $s_y$ 는 각각 유입량을 대수변환(log transformation)한 자료의 평균과 표준편차이다. 표 6에 제시된 이산화된 대표 확률값과 유입량 대표값을 사용하여 식 (2)의 SDP-N 모형을 다시 나타내면 다음과 같다.

표 6. 정규분포의 이산 대표 확률값과 이에 따르는 표준정규 확률변수와 총주댐 유입량 대표값

	대표 확률값 <sup>*1</sup>	표준정규 확률변수 <sup>*2</sup>	총주댐 유입량 대표값 (백만 m <sup>3</sup> )											
			1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
$q^1$	0.271	1.22	129	149	431	921	632	700	2657	1649	1474	432	279	200
$q^2$	0.458	0	74	65	186	418	277	236	1120	783	552	194	145	107
$q^3$	0.271	-1.22	43	29	81	190	122	79	472	371	207	87	76	58

\*1. 식(7)의  $z$  에 해당하는 값

\*2. 식(8)의  $\Pr\{q^i\}$ 에 해당하는 값

$$f_{opt}^n(S_t) = \sum_{i=1}^3 \Pr\{q^i\} [\max_{R_t} \{B_t(S_t, q^i, R_t) + f_{opt}^{n-1}(S_{t+1})\}] \quad (8)$$

여기서  $\Pr\{q^i\}$ 는  $i$ 번째 유입량  $q^i$ 의 무조건 확률을 의미한다.

총주댐의 경우 Kim과 Lee(2000)의 연구 결과에 나타난 바와 같이 ENSO가 영향을 미치는 기간은 ENSO가 발생한 해의 9월부터 다음해 2월까지의 갈수기이므로 본 연구에서도 수문상태변수를 그 기간에만 사용하였다. 즉, 표 1에서 Case1은 3월부터 7월, Case2는 2월, Case3은 8월, 그리고 Case4는 9월부터 다음 해 1월까지로 설정하였으며, 1년 중 8월에 ENSO 정보를 갱신할 수 있다고 가정하였다. SDP-E 모형의 Case1은 수문상태변수를 사용하지 않았으므로

식 (8)과 동일한 순환식으로 표현할 수 있다. 9월부터 다음 해 2월까지 (즉, 표 1과 2의 Case2와 Case4) 사용된 기대값 연산자  $E_{Q|J_t}$ 를 이산확률로 표현하기 위해서는 표 6의 대표 확률값을 사용하였다. 그러나 이에 상응하는 유입량 대표값은 식 (8)에 나타난 대표값  $q^i$ 와 다른 값을 가지게 되는데, 이는 표 5에 나타난 바와 같이 ENSO의 영향으로 유입량의 평균과 분산이 변하여 식 (7)으로 계산되는 대표값도 역시 변하기 때문이다. 즉, 유입량을 대수정규분포로 가정한 경우 유입량의 평균과 분산의 변화로 야기되는 분포의 변화를 의미하며, 그림 2는 엘니뇨의 예를 보여주고 있다.

마지막으로 8월(즉, 표 1과 2의 Case3)의 순환식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

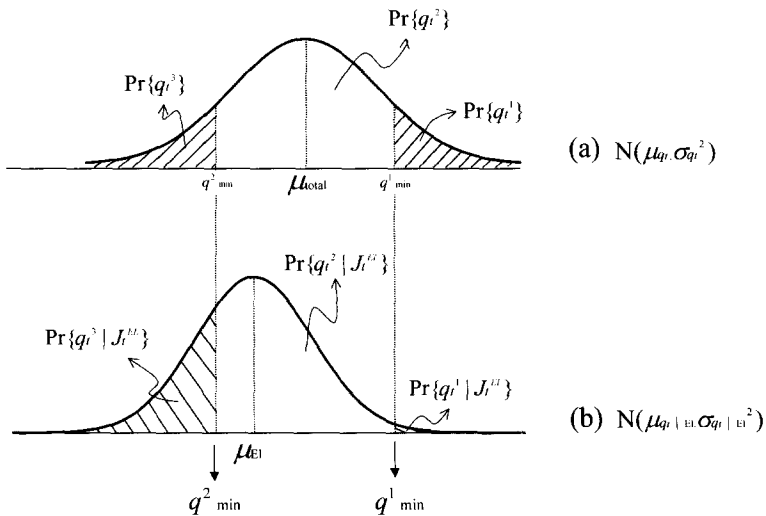
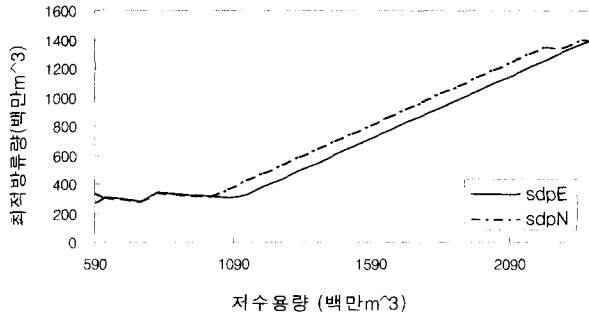
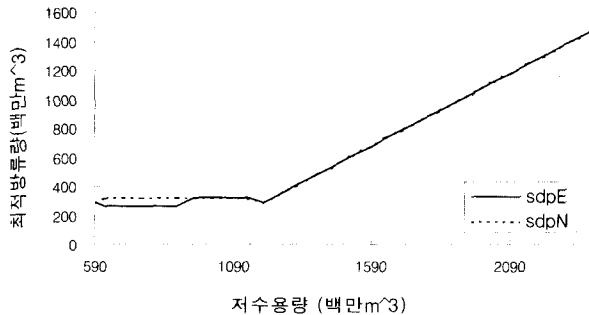


그림 2. 총주댐 유입량의 무조건 확률과 ENSO를 고려한 조건부 확률: 엘니뇨의 예



(a) 8월



(b) 9월

그림 3. SDP-N과 SDP-E로 산출된 총주담 운영율의 예

$$f_{opt}^n(S_t) = \sum_{i=1}^3 \Pr\{q_t^i\} [\max_{R_t} \{B_t(S_t, q_t^i, R_t) + \sum_{J_{t+1}=E, La, Ne} \Pr\{J_{t+1}\} f_{opt}^{n-1}(S_{t+1})\}] \quad (9)$$

여기서  $\Pr\{J_{t+1}\}$ 는 다음해가 엘니뇨 해, 라니냐 해, 그리고 평년이 될 확률을 의미하며, 과거자료를 근거로 산정할 수 있다. 표 4에 나타난 바와 같이 1956년부터 1997년까지 총 42년 동안 엘리뇨 해, 라니냐 해, 그리고 평년은 각각 9년, 7년, 그리고 25년 발생하였으므로, 그 확률을 각각  $\Pr\{J_{t+1}=E\} = 10/42$ ,  $\Pr\{J_{t+1}=La\} = 7/42$ , 그리고  $\Pr\{J_{t+1}=Ne\} = 25/42$ 로 산정하였다.

이렇게 산출된 SDP-N과 SDP-E의 운영율의 예를 그림 3에 나타내어 비교하였다.

### 3.4 모의운영 결과

전술한 SDP-N과 SDP-E 모형으로 산출된 총주담

의 최적운영율은 모의운영을 통하여 비교된다. 본 연구에서는 1956년부터 1997년까지 총 42개년의 과거 월 유입량 자료를 이용하여 모의운영을 실시하였으며, 각 최적운영율에 대하여 발전량, 월류량, 부족량 등을 비교하였다. 본 연구에서 월류량은 최적방류량으로 방류하면, 다음달의 수위가 상시만수위를 넘게 될 것이 예상될 때, 최적방류량보다 많이 방류를 해야하는 양이며, 부족량은 이와 반대로 다음달의 수위가 저수위 이하로 내려갈 것이 예상되는 경우, 최적방류량보다 적게 방류해야 되는 양을 뜻한다. 그림 4는 SDP-N과 SDP-E 모형의 모의운영의 결과를 총 발전량, 보장 유하량의 부족량, 월류 총량, 부족 총량에 대하여 비교한 그림이다. SDP-E의 경우 SDP-N보다, 약 3% 정도 총 발전량이 증가하였고, 보장 유하량의 부족량은 약 29% 감소하였으며, 월류 총량과 부족 총량은 각각 약 5%, 약 7% 감소하였다. 이밖에 SDP-E를 사용하면 SDP-N보다 보장 출력에 대한 부족량은 약 47% 감소하였고, 부족 횟수, 보장 유하량의 부족 횟수, 보장 출력의 부족 횟수 역시 각각 19%, 17%, 41% 감소하

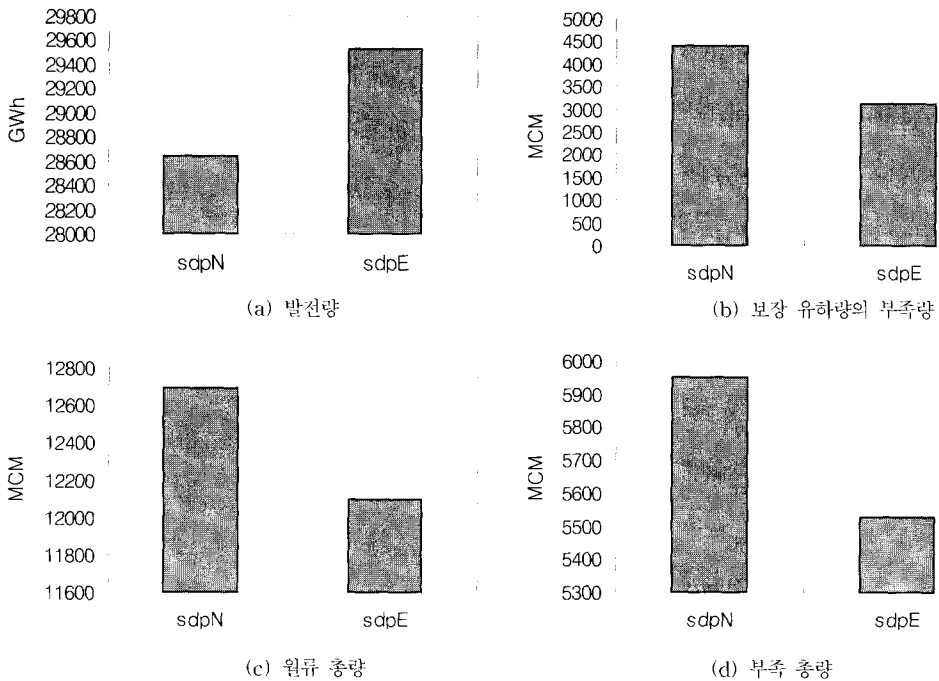


그림 4. 모의운영 결과 비교

였다. 이상의 결과로 충주댐의 경우 SDP-E 모형이 발전량과 용수공급의 안정성을 증대시키고 동시에 월류량을 감소시키는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론과 제언

본 연구에서는 ENSO 정보를 저수지 운영의 최적화모형에 이용할 수 있는 일반적 기법을 제시하였다. 즉, ENSO 정보를 SDP의 수문상태변수로 사용하여, 충주댐의 월 운영을 산출하였다. 모의운영 결과, 이렇게 개발된 SDP-E는 ENSO 정보를 사용하지 않은 SDP-N 보다 발전량과 용수공급 등의 이행지표(Performance Criteria)에서 우수함을 알 수 있었다.

그러나 다른 ENSO 연구와 마찬가지로, 본 연구도 자료기간의 한계성을 가지고 있다. 즉, 총 42년 동안 엘니뇨는 9년, 라니냐는 7년밖에 발생하지 않았기 때문에, 이를 근거로 계산한 유입량의 조건부 확률도 유입량의 모집단을 대표한다고 말하기 어렵다. 그러므로 앞으로 더 많은 자료가 축적됨에 따라 이러한 연구결과의 꾸준한 개선이 급선무이며, 동시에 ENSO 정보를 고려한 유입량 자료를 모의발생하는 기법 등의 연구도 병행해야 할 것이다.

또한, 충주댐의 경우 12월, 1월, 2월의 3개월 동안은 유입량의 자기상관계수가 0.5 이상으로 유의하므로, 지난달의 유입량을 ENSO 정보와 함께 수문상태변수로 사용하는 연구도 필요하다. 그러나, 이 또한 일반 방법론의 제시는 가능하나, 모형의 적용시 자료기간의 한계를 최소화함이 선행되어야 한다.

#### 감사의 글

저자는 충주댐 운영을 위한 전산 프로그램과 여러 가지 조언을 제공해 주신 한국수자원공사의 이광만 박사님께 감사드립니다. 또한 세심한 심사평을 보내주신 세분의 심사자께도 감사를 드립니다. 이 연구는 교육부의 '21세기 지식기반사회 대비 고등인력양성사업(BK21)'의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

#### 참고 문헌

- 고석구, 이광만, 이한구 (1997). "양해 추계학적 동적계획법에 의한 저수지 운영률 개발", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, Vol. 30, No. 3, pp. 269~278.
- 한국수자원공사, (1991). 신뢰도를 고려한 저수지의



월별 운영을 개발, 연구보고서.

한국수자원공사, (1999). 다목적댐 운영 실무편람, 한국수자원공사.

Doran, D.G. (1975). "An efficient transition definition for discrete state reservoir analysis: the divided interval technique." *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 6, pp. 867~873.

Hamlet, A.F. and Lettenmaier, D.P. (1999). "Columbia river streamflow forecasting based on ENSO and PDO climate signals", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 125, No. 6, pp. 333~341.

Kim, Y.-O. and Lee, H.-S. (2000). "Korean streamflow patterns in relation to El Nino/Southern Oscillation", *Water Engineering Research*, Vol. 1, No. 2, pp. 107~117. \

Pegram, G., Stedinger, J.R., Payne, K. and Born, P. (1991). *Statistical analysis program for SDP optimization*, unpublished manuscript, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, USA.

Piechota, T.C., Dracup J.A., and Fovell R.G. (1997). "Western U. S. streamflow and atmospheric circulation patterns during El Nino-Souther Oscillation (ENSO)", *Journal of Hydrology*, Vol. 201(1-4), pp. 249~271.

Ropelewski, C.F., and Jones, P.D. (1987). "An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index", *Monthly Weather Reviews*, 113, pp. 1101~1106.

Tejada-Guibert, J.A., Johnson, S., and Stedinger, J. (1995). "The value of hydrologic information in stochastic dynamic programming models of a multi-reservoir system", *Water Resources Research*, 31(10), pp. 2571~2579.

Yeh, W. W-G. (1985). "Reservoir management and operation models: a state-of-the-art review", *Water Resources Research*, 21(12), pp. 1797~1818.

(논문번호:00-040/접수:2000.06.22/심사완료:2000.08.31)