

기후 변화를 고려한 수자원 관리 기법

Incorporating Climate Change Scenarios into Water Resources Management

김 영 오*

Kim, Young O

Abstract

This study reviewed the recent studies for the climate change impact on water resource systems and applied one of the techniques to a real reservoir system - the Skagit hydropower system in U.S.A. The technique assumed that the climate change results in $\pm 5\%$ change in monthly average and/or standard deviation of the observed inflows for the Skagit system. For each case of the altered average and standard deviation, an optimal operating policy was derived using a SDP (Stochastic Dynamic Programming) model and compared with the operating policy for the non-climate change case. The results showed that the operating policy of the Skagit system is more sensitive to the change in the streamflow average than that in the streamflow standard deviation. The derived operating policies were also simulated using the synthetic streamflow scenarios and their average annual gains were compared as a performance index. To choose the best operating policy among the derived policies, a Bayesian decision strategy was also presented with an example.

keywords : climate change, reservoir operating policy, stochastic dynamic programming, Bayesian decision theory

요 지

본 연구는 기후 변화가 수자원 시스템에 미치는 영향에 대한 최근의 연구 동향을 살펴보고, 그 중의 한 기법을 미국의 Skagit 시스템에 실제로 적용해 보았다. 적용된 기법에서는, 기후변화로 인하여 Skagit 시스템의 월별 유입량의 평균과 분산이 $\pm 5\%$ 증가한다고 가정하였다. 평균과 분산이 변화한 각각의 경우에 대하여 월별 운영률을 추계학적 동적 계획법으로 구하고 기후 변화가 없다고 가정한 경우의 운영률과 비교하였다. 그 결과 Skagit 시스템의 월별 운영률은 유입량 분산의 변화보다는 평균의 변화에 더욱 민감함을 보였다. 또, 결정된 운영률들은 모의 발생된 유입량 시나리오들을 이용하여 그 효율성을 비교하였는데, 운영률의 평가 지표로는 평균 연간 수익을 사용하였다. 산출된 운영률 중 가장 최선의 운영률을 선택하기 위하여, 본 연구에서는 Bayesian 결정 기법을 간단한 예로 설명하였다.

핵심용어 : 기후 변화, 저수지 운영률, 추계학적 동적 계획법, Bayesian 결정 이론

* Research Associate, Global Hydrology and Climate Center, Huntsville, Alabama, U.S.A.

1. 머리말

수자원의 효율적 관리는 물의 수요와 공급을 얼마나 정확히 예측하느냐에 달려있다. 최근 학자들의 관심이 집중되고있는 기후 변화(climate change)는 수문 현상에 많은 영향을 미쳐, 이러한 수문학적 예측을 더욱 어렵게 하고 있다. 따라서, 강우량과 유량 등의 수문 변수들이 정상 시계열(stationary time series)이라는 가정 하에서 설계, 운영되고 있는 대부분의 수자원 시스템의 전반적인 고찰이 필요한 시점이다.

지구 온난화 현상은 인간이 배출하는 CO₂, CH₄, 그리고 N₂O 등의 greenhouse gas로 인한 범지구 평균 지표 온도(global mean surface temperature)의 상승을 말하며(Chang 등, 1992), 온도 상승을 예측하는데 정도 차이는 있으나 많은 학자들이 GCM(General Circulation Model)을 이용한 시뮬레이션을 통하여 지구 온난화에 동의하고 있다(Fiering과 Rogers, 1989). 예를 들면, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996)는 2100년까지 greenhouse gas의 배출 정도에 따라 1~3.5 °C의 온도 상승과 3~15 %의 범지구 평균 강우량의 증가를 예측했다. 그러나 온도와 강우량 외의 수문 변수들, 즉 증발량과 유출량 등의 범지구(global) 평균량의 예측은, 모델에 따라 예측량에 많은 차이를 보이고 있을 뿐만 아니라 수문 변수들의 지역적 변화를 예측하기란 더욱 어려운 실정이다.

기후 변화가 수자원 시스템에 미치는 영향을 분석하는 방법으로는 대기, 수문, 그리고 수자원 모형들을 연쇄적으로 연결하는 기법이 최근 보편화되어 있는데(Lettenmaier와 Sheer, 1991; Lettenmaier 등, 1996), 각 모형화 단계를 살펴보면 다음과 같다. (1) GCM을 이용하여 평균 강우량과 온도 등 대기(atmospheric) 변수들의 장기 변화를 예측하고 미래에 예상되는 몇 가지 가상 대기 시계열 시나리오(atmospheric time series scenario)들을 발생시킨다. (2) GCM에 사용된 단위 격자(grid)는 유역의 규모(scale) 보다 몇 십 배 이상 크기 때문에 GCM의 대기 변수들을(상대적으로 작은 규모의) 수문 모형의 지표 변수들로 연결 시켜주는 축소(downscaling) 기법이 필요하다. (3) 이렇게 축소 조정된 지표 수문 변수들의 시계열 시나리오들을 수문 모델에 입력하여 강유역의 유량 시계열 시나리오(streamflow time series scenario)를 발생시킨다. (4) 산출된 유량을 수

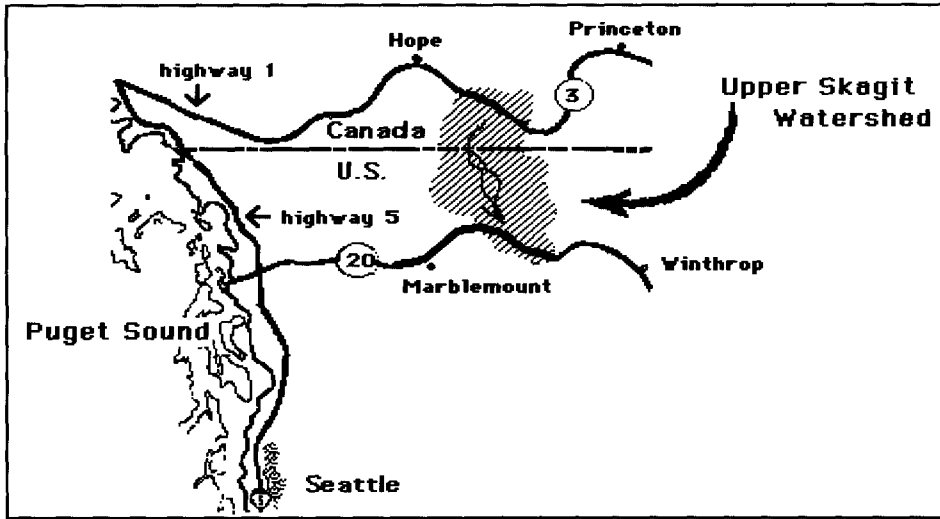
자원 시스템 운영 모형에 입력하여, 수자원 시스템이 어떻게 반응할 것인가를 예측하고 그 민감도를 분석한다. 이러한 모형화 과정은 각 단계마다 불확실성을 피할 수 없는데, 그 중 축소 기법 과정 중 수반되는 불확실성이 상대적으로 크다고 알려져 있으며 이에 대한 연구가 가장 활발히 진행 중이다.

위의 연쇄(chain) 모형화를 이용한 기후 변화에 대한 수문학자들의 연구는 최근 5년 동안 진행되었으나, 이러한 연구의 시작은 수자원 시스템에 유입되는 유량의 평균과 분산이 시간에 따라 정상(stationary)이라는 시계열 모형의 기본 전제에 의구심을 품기 시작한 시점으로 올라간다. 지구의 온난화 이론이 각광을 받기 전 이미 Lettenmaier와 Burges(1978)는 '장기 지속성(long-term persistence)을 지닌 유량의 정상 시계열'과 '평균이 비정상인 시계열'을 구별하기는 힘들지만, 두 시계열이 수자원 시스템에 미치는 영향은 현저히 다를 수 있음을 보여주었다.

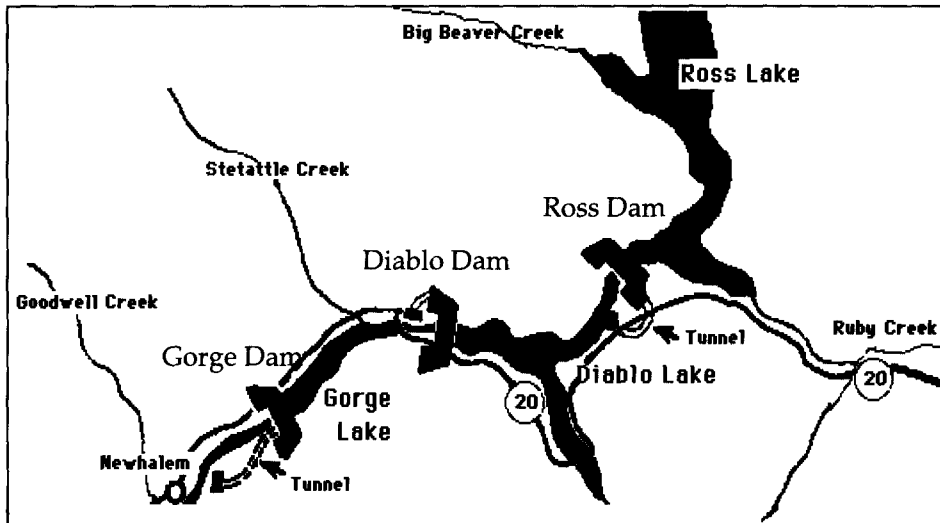
이와 같이 기후 변화는 수문학의 관점에서 보면 유량 특성의 변화를 의미하므로 유량의 통계 변수들, 즉 평균, 분산, 자기상관도, 왜곡도 등을 변화시켜 그에 대한 수자원 시스템의 민감도를 살펴볼 수 있다(Schwarz, 1977). 이러한 기법은 연구하고자 하는 유역에 대한 구체적 대기-수문 모형이 개발되기 전에도 비교적 간단히 현재 사용 중인 시스템의 운영률(operation policy)의 기후 변화에 대한 민감도를 유량 특성 변화의 관점에서 살펴볼 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이 기법을 미국의 Skagit 수력발전 시스템에 적용하여, 저수지 유입량의 평균과 분산의 변화에 저수지 시스템이 어떻게 반응하는가를 살펴보았으며, 그에 따른 운영률의 결정방안을 제시하고자 한다.

2. 연구 대상 유역

Skagit 수력발전 시스템은 워싱턴 주의 북동쪽에 위치하고 있으며(그림 1), Seattle 시에 연간 약 200 Mwh의 전기에너지를 공급하고 있다. 이 시스템은 3개의 댐으로 구성되어 있으나, 가장 상류인 Ross 댐의 저수용량이 나머지 두 댐에 비해 압도적으로 크므로, 월 별 운영에서는 Ross 댐만 수위 변화가 있고 Diablo와 Gorge 댐의 수위는 각각 367.3 m 와 266.7 m로 일정하다고 가정하였다. 이들 3개의 댐에 들어오는 총 자연 유입량은 1929년부터 60년 동안의 자료를 분석한 결과, 그 평균과 분산이 유량의 일반적 특성인 월별 변동을 보여주고 있으므로(표 1), 주기적 정상



(a) Skagit 수력발전 시스템의 위치



(b) Skagit 수력발전 시스템의 상세도

그림 1. Skagit 수력발전 시스템의 위치와 상세도

(periodically stationary) 시계열로 가정하였다. 또한 월별 유입량 시계열은 수문 통계 소프트웨어인 SPIGOT으로 분석한 결과 lognormal 분포로 가정하였다(Kim과 Palmer, 1997).

3. 저수지 운영률의 개발

수력발전을 위한 저수지 운영률의 개발에는, 발전량

함수가 비선형이고 유입량, 에너지 수요, 그리고 에너지 단가 등의 예측이 불확실하기 때문에 비선형성과 추계성(stochasticity)을 효과적으로 다룰 수 있는 최적화 기법이 필요하다. 추계학적 동적 계획법(Stochastic Dynamic Programming, 이하 SDP)은 목적 함수의 형에 제한이 없어 비선형성을 다룰 수 있고, 추계성을 확률 함수로 표현할 수 있다는 장점으로

표 1. Skagit 유역의 월별 유입량 통계

	평균 (cfs)	평균 (m ³ /sec)	분산 (cfs)	분산 (m ³ /sec)	자기상관 계수
1월	2375	67.26	1287	36.45	0.30
2월	2305	65.28	1283	36.33	0.56
3월	2336	66.16	1084	30.70	0.40
4월	4121	116.71	1699	48.12	0.33
5월	9202	260.60	2482	70.29	0.30
6월	10876	308.01	3506	99.29	0.16
7월	6641	188.07	2596	73.52	0.73
8월	3364	95.27	996	28.12	0.89
9월	2237	63.35	572	16.20	0.55
10월	2337	66.18	1132	32.06	0.42
11월	2883	81.65	1662	47.07	0.57
12월	2910	82.41	1773	50.21	0.52

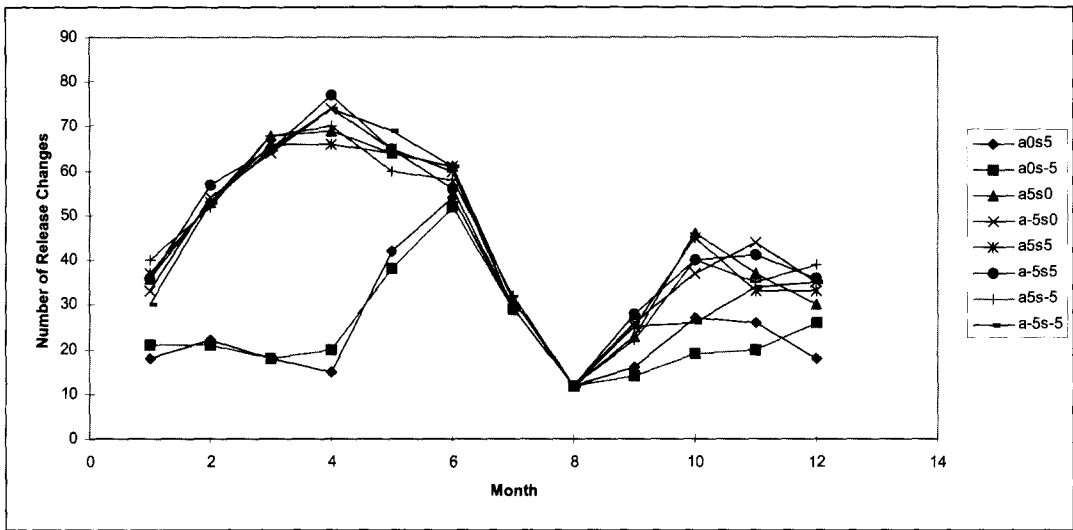
인해 저수지 관리에 널리 사용되어져 왔다. Kim과 Palmer(1997)는 Skagit 수력발전 시스템의 운영을 위해 몇 가지 SDP 모형들을 개발하였는데, 각 모형마다 수문 상태 변수(hydrologic state variable)와 천이 확률 함수(transition probability)를 다르게 정의하여, 그에 따른 월별 방류량과 평균 연간 이익(average annual gain)을 비교하였다. 그 결과 계절별 유입량의 예측을 수문 상태 변수에 포함시킨 Bayesian SDP 모형이 Skagit 시스템의 운영에 가장 우수함을 보였다. 그러나, 본 연구에서는 이 모형들 중 현재 유입량을 수문 상태 변수로 사용한 모형(SDP-Q)을 채택하였는데 이 모형의 recursive equation은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f_{opt}^n(S_t, Q_t) &= \max_{R_t} [B_t(S_t, Q_t, R_t) + E_{Q_{t+1}|Q_t} f_{opt}^{n-1}(S_{t+1}, Q_{t+1})] \\
 &= \max_{R_t} \left[B_t(S_t, Q_t, R_t) + \sum_{Q_{t+1}} \lambda(Q_{t+1}|Q_t) \cdot f_{opt}^{n-1}(S_{t+1}, Q_{t+1}) \right]
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

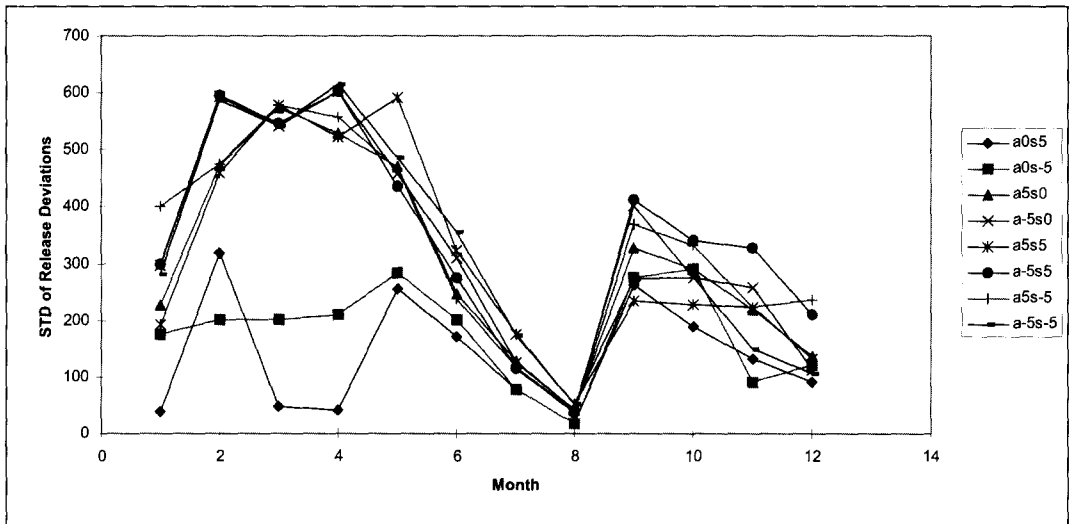
여기서 S_t 는 기간 t월의 월 초 저류량, Q_t 는 기간 t월 동안의 유입량, R_t 는 기간 t월 동안의 유출량, $B_t(\cdot)$ 는 기간 t월 동안에 발생하는 수익 함수, 그리고 $f_{opt}^n(\cdot)$ 는 기간 n부터 계획 끝 기간까지 최적 운영으로 발생하는 총 수익 함수이다. 이 모형을 사용하면 천이 확률 함수 $\lambda(Q_{t+1}|Q_t)$ 를 통하여 유량의 월별 자기상관관계(autocorrelation)를 저수지 운영 결정에 고려할 수 있다. 본 연구에서 수익 함수는 잉여 발전 에너지량과 에너지 단가의 곱으로 정의하였으며, 에너지 수요와 단가의 불확실성은 고려하지 않았

다. 제약 조건에는 최대 저류량, 최대 방류량, 최대 발전량, 최소 저류량, 최소 방류량 등을 포함시켰다.

위의 SDP-Q식을 풀기 위해서는 상태 변수들을 이산화(Discretize) 하는데, 저류 상태 변수는 Savarenskiy의 기법(Klemes, 1977)으로, 수문 상태 변수는 Pegram(Pegram 등, 1991)의 기법으로, 각각 22개와 5개의 구간으로 이산하였다. 그러므로, SDP-Q 모형은 이산된 저류 상태 변수와 수문 상태 변수의 각각의 조합에 대하여 방류량을 계산하는데, 매 달 총 110(=22×5) 가지의 경우의 수가 생긴다. 천이 확률 함수 역시 이산된 유입량의 대표값을 이용하여 Alarcon-Mark의 기법 (Alarcon와 Mark, 1979)으로 계산하였다. 이러한 유입량의 이산 기법과 천이 확률 함수의 계산 기법은 유입량이 정규 분포라는(또는 정규 분포로 변형된다는) 가정 하에서 유입량의 평균과 분산을 입력 값으로 이용한다. 그러므로, 기후 변화를 고려하기 위해서 유입량의 평균과 분산의 변화를 가정하면 이산된 천이 확률들이 변화하고 결과적으로 구하고자 하는 운영률의 변화를 가져오게 된다. 본 연구에서는 Skagit 유역에 유입되는 총 월별 유입량의 평균과 분산을 각각 5 % 증가 또는 감소시키고 그 가정 하에서 SDP-Q 모형으로 월별 운영률들을 구하여보았다. (이 글에서는, 유입량의 평균이 R_a %, 그리고 분산이 R_s % 증가한 경우를 $a R_a : s R_s$ 로 부르기로 하겠다. 예를 들면, $a5 : s-5$ 는 유입량의 평균이 5 %, 그리고 분산이 -5 % 증가한 경우를 가리킨다.) 이렇게 결정된 운영률들, 기후 변화가 없다고 가정한 기본 운영률($a0 : s0$)과 비교하기 위해서, 변화된 방류량 ($R_{aR_a : sR_s}(i, j)$)과 기본 방류량 ($R_{a0 : s0}(i, j)$)의 편차, $d(i, j)$ 를 구하여 보았다. 그림 2(a)는 매달 이산된 상태 변수의 총 조합 수 110 가지의 경우 중 $d(i, j) \neq 0$ 인 경우가 몇 번이나 되는지를 보여주고 있고, 그림 2(b)는 $d(i, j)$ 의 월별 평균을 보여주고 있다. 그림 2에서 나타난 결과를 종합해 살펴보면 첫째로, 평균의 변화가 없다고 가정하여 구한 두 경우의 운영률들 ($a0 : s5$ 와 $a0 : s-5$)이 상대적으로 기본 운영률과의 차이가 적었고, 평균의 변화를 가정한 나머지 6가지 경우의 운영률들은 정도의 차이는 있으나 기본 운영률과 상당한 차이를 보여주고 있다. 그러므로 Skagit 시스템의 운영률은 유입량의 평균의 변화에 더욱 민감히 반응함을 알 수 있다. 둘째로, 기본 운영률과의 차이는 봄철(특히 4월)에 가장 컸고, 여름철(특히 8월)에 가장 적었다.



(a) 기본 방류량과의 편차의 월별 총 수



(b) 기본 방류량과의 편차의 월별 평균

그림 2. 평균과 분산이 변한 8가지 경우들의 방류량과 기본 방류량과의 편차

데, 이는 여름철에는 상대적으로 에너지 수요가 적고 에너지 판매단가가 싸므로, 많은 경우 최소량만을 방류하여 그로 인한 조절 폭이 적기 때문이다.

4. 시뮬레이션 분석

유입량의 평균과 분산의 변화를 가정하여 최적화 모형으로 구한 운영률은 시뮬레이션 모형을 통하여 저수지 시스템에 적용해 그 유용성을 검토해

볼 수 있다. 이 시뮬레이션 모형은 과거(historical) 또는 모의(synthetic) 유입량 자료를 이용하는데, 본 연구에서는 기후 변화가 없는 시나리오에는 1929년부터 60년 동안의 과거 자료를 사용하였고, 평균과 분산이 각각 R_a 와 R_s % 증가한 경우의 scenario는 아래의 모의 식을 이용하여 60년 동안의 유입량을 발생시켜 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 y_i &= \mu_{y_i} + \left(\frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \right) \sigma_{y_i} \\
 &= \left(1 + \frac{R_a}{100} \right) \mu_{x_i} + \left(\frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \right) \left(1 + \frac{R_s}{100} \right) \sigma_{x_i} \\
 &= \left(1 + \frac{R_s}{100} \right) x_i + \left(\frac{R_a - R_s}{100} \right) \mu_{x_i}
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 μ_y 와 σ_y 는 발생시킬 자료 y 의 평균과 분산이고, 실제 자료의 모평균과 분산, μ_x 와 σ_x 는 60년 동안의 실제 자료 x 의 표본 평균과 분산으로 가정하였다. 식 (2)에서 실제 자료 x 와 모의 자료 y 는 정규 분포를 따르고 평균과 분산 이외의 변화는 없다고 가정했다. 본 연구에서는 표 2에서와 같이 분산을 변화시키지 않고(즉, $R_s = 0$) 평균을 -5%, 0%, 그리고 5% 증가시킨 3가지 경우의 유입량 시나리오들을 가상하였다. 이렇게 발생시킨 각 시나리오에 최적화 모델에서 구한 운영률들 중 $a5:s0$, $a0:s0$, 그리고 $a-5:s0$ 의 운영률들을 시뮬레이션 모형에 각각 적용시켜 60년 동안의 평균 연간 수익(average annual gain, 이하 AAG)을 구하여 보았다. 예를 들면, 표 2에서 $AAG(1, 3)$ 은 유입량의 평균이 5% 감소하리라 예상하고 운영률을 구하여 적용하였으나 실제로는 유입량의 평균이 5% 증가한 경우의 평균 연간 수익을 계산한 경우이다. 표 2에서 대각선에 위치한 평균 연간 수익 $AAG(i, i)$ 가 같은 종렬(즉, 실제 시나리오가 같은 경우)의 평균 연간 수익 $AAG(i, j)$ 보다 큰데, 그 이유는 $AAG(i, i)$ 의 경우 운영률 결정에서 가정한 시나리오와 실제 시나리오가 일치하기 때문이다. 또, 같은 횡렬에서(즉, 적용된 운영률이 같을 때) R_a 가 커질수록(즉, 오른쪽으로 갈수록) AAG 가 커지는 이유는 같은 방류량에 대해 유입량이 많아지면 수위가 높아져 발전량도 많아지기

때문이다. 하지만 목적 함수에 함수 고려와 관련된 penalty를 포함시키면 발전을 위한 목적과 함수 조절을 위한 목적의 상대적 중요도에 따라 이 경향은 달라질 수 있다.

표 2와 같은 시뮬레이션 결과를 얻은 후 마지막으로 남은 문제는 어떤 운영률을 선택하는가이다. 이러한 선택은 각 유입량 시나리오가 일어날 확률에 의존하지만, Skagit 유역에 대해서는 그러한 확률 평가가 아직 이루어지지 않았으므로, 여기서는 간단한 예로 저수지 운영 전략(strategy)을 설명하고자 한다. 만일 기후 변화를 고려한 저수지 관리에 있어 표 2의 3가지 시나리오들 중 어떤 경우가 일어날지 주관적 또는 객관적 정보가 전혀 없다면, 각 시나리오에 각각 1/3의 확률을 부과하여 그 기대값을 구하여야 할 것이다. 이 경우 각 운영률에 대한 평균 연간 수익의 기대값은 $a-5:s0$, $a0:s0$, 그리고 $a5:s0$ 의 운영률인 경우 각각 $(4.2+6.6+8.8)/3=19.6/3$, $(4.1+6.8+8.9)/3=19.8/3$, $(3.9+6.5+9.2)/3=19.6/3$ 으로 계산되어, 기대값이 최대인 $a0:s0$ 의 운영률을 선택할 것이다. 그러나, 전문가들의 의견을 바탕으로, 지구 온난화가 유입량의 증가를 가져오리라 추측되는 경우 그 사전확률(prior probability)을 각각 $\Pr(R_a=-5) = 0.1$, $\Pr(R_a=0) = 0.3$, $\Pr(R_a=5) = 0.6$ 이라 가정해보자. 이 경우 $a-5:s0$, $a0:s0$, 그리고 $a5:s0$ 의 운영률에 대한 평균 연간 수익의 기대값은 각각 0.79, 0.80, 0.81이 되어, 기대값이 최대인 $a5:s0$ 의 운영률을 선택할 것이다. 이러한 사전 확률은 대기온도의 새로운 관측이 가능할 때마다 Bayes 정리에 의해 사후확률(posterior probability) $\Pr(R_a | \theta_i)$ 로 다시 평가되어야 하며, 이에 따라 운영률도 다시 선택되어야 할 것이다.

표 2. 평균의 변화를 가정하여 구한 운영률의 시뮬레이션을 통한 평균 연간 수익

		Scenario for Simulation Model		
		Case 1 ($R_a = -5\%$)	Case 2 ($R_a = 0\%$)	Case 3 ($R_a = 5\%$)
Scenario for Optimization Model	Case 1 ($R_a = -5\%$)	AAG(1,1) = 4.2	AAG(1,2) = 6.6	AAG(1,3) = 8.8
	Case 2 ($R_a = 0\%$)	AAG(2,1) = 4.1	AAG(2,2) = 6.8	AAG(2,3) = 8.9
	Case 3 ($R_a = 5\%$)	AAG(3,1) = 3.9	AAG(3,2) = 6.5	AAG(3,3) = 9.2

R_a : 평균의 변화 비율

5. 맺음말

본 연구에서는 기후 변화로 인해 유입량의 평균과 분산이 5 % 증가 또는 감소하는 경우를 가정하여, 그에 따른 운영률과 수자원 시스템의 변화를 살펴보았다. Skagit 시스템의 경우 그 운영률과 평균 연간 수익은 이러한 유입량의 특성 변화에 민감히 반응함을 보여주었다.

지난 1997년의 겨울은 지구 온난화와 엘니뇨 현상의 이 중 효과로 인해, 대부분의 태평양 연안의 국가들에게는, 1991년의 기록을 다시 경신하여 가장 따뜻한 겨울로 기록되었다. 이러한 기후 변화는 강우량, 증발량, 그리고 유량 등의 수문 변수들의 변화로 이어짐은 자명한 사실이지만, 지역적 변화가 커 각 유역마다 그에 알맞은 대기-수문 모형들이 개발되어야 한다. 우리나라에서도 이러한 연구를 위한 연계 모형화가 필요함은 물론, 본 연구에서 제시한 기법을 이용한 수자원 시스템 운영률의 전반적 재고가 필요한 시점이라 하겠다.

참고 문헌

Alarcon, L.F. and Marks, D.H. (1979). *A stochastic dynamic programming model for the operation of the high Aswan dam*. Technical Report No. 246, MIT, Cambridge, Mass., USA.

Chang, L.H., Hunsaker, C.T. and Draves, J.D. (1992). "Recent research on effects of climate change on water resources." *Water Resources Bulletin*, Vol. 28, No. 2, pp. 273-286.

Fiering, M.B. and Rogers, P. (1989). *Climate change and water resources planning under uncertainty*. Report submitted to U.S. Army Institute for Water Resources, Fort Belvoir, VA, USA.

Intergovernmental Panel on Climate Change (1996). *Climate Change 1995: The Science of*

climate." Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Kim, Y.-O. and Palmer, R. N. (1997). "Value of seasonal flow forecasts in Bayesian stochastic programming." *Journal of Water Resources Planning and Management* Vol. 123, No. 6, pp. 327-335.

Klemes, V. (1977). "Discrete representation of storage for stochastic reservoir optimization", *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 1, pp. 149-158.

Lettenmaier, D. P. and Sheer, D.P. (1991). "Climate sensitivity of California water resources." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 117, No. 1, pp. 108-125.

Lettenmaier, D.P. and Burges, S.J. (1978). "Climate change: Detection and its impact on hydrologic design." *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 4, pp. 679-687.

Lettenmaier, D.P., Palmer, R.N. and Wood, A.W. (1996). *The implications of global warming for U.S. water resources*. University of Washington, USA.

Pegram, G., Stedinger, J. R. and Born, P.H. (1991). *Statistical analysis program for SDP optimization*. Dept. of Environmental Eng., Cornell University, Ithaca, NY, USA.

Schwarz, H.E. (1977). "Climate change and water supply: How sensitive is the northeast?" *Climate, Climate Change, and Water Supply*, Chapter 7, National Academy of Science.

(논문번호:98-020/접수:98.04.14/심사완료:98.06.01)