

신뢰성 분석을 통한 기존 댐 재개발의 적정규모 결정의 관한 연구

Optimum Size Analysis for Dam Rehabilitation Using Reliability Analysis

권 현 한* / 문 영 일** / 최 병 규*** / 윤 용 남****

Kwon, Hyun-Han / Moon, Young-Il / Choi, Byung-Gyu / Yoon, Yong-Nam

Abstract

This paper presents a procedure of evaluation of reservoir capacity for additional water storage for dam rehabilitation. One of the techniques on the extension of rainfall has been developed, and the daily stream flows were simulated by the NWS-PC long-term rainfall-runoff model with the input of the extended daily rainfall which was stochastically generated by the nonhomogeneous markov chain model. We performed a reliability analysis to Guisan dam about the optimal capacity of dam rehabilitation by using performance criteria that Hashimoto et al.(1982) presented. We estimated that the most suitable water level is approximately 155EL.M. suggested that this method can use supplemental methods to estimate optimum dam scale.

keywords : dam rehabilitation, reliability analysis, NWS-PC, nonhomeogenous markov chain, optimum size

요 지

본 연구에서는 기존댐 재개발에 따른 댐 재개발 최적 규모 선택을 위한 방법론을 제시하고자 한다. 최적규모의 분석을 위한 과정은 다음과 같다. 강우량은 비동질성 Markov 모형으로 모의 발생하여 비교적 실제 구조에 가깝도록 설계된 토양함수 모형(Sacramento Soil Moisture Accounting Model, SAC-SMA)과 HEC-1의 Kinematic wave 하도추적 모형을 결합하여 만든 미 기상국의 NWS-PC 모형을 이용하여 유입량으로 변환하였다. 유입량은 저수지 모의운영을 통하여 저수지의규모를 결정하였다. 피산댐을 대상으로 Hashimoto 등 (1982)이 제시한 신뢰성 기준을 바탕으로 재개발 적정규모에 대한 신뢰성 분석을 실시하였으며 대략 155EL.M가 최적 수위로 판단되었으며 댐규모를 판단하기 위한 보조수단으로 이용이 가능하리라 사료된다.

핵심용어 : 댐 재개발, 신뢰성분석, NWS-PC, 비동질성 markov 모형, 최적규모

1. 서 론

국내의 댐 재개발에 대한 자료는 매우 부족한 상태이고, 이에 대한 연구 또한 미비한 상태이다. 국내와 비교할 때 해외에서는 댐 재개발에 대한 연구가 비교적 활발하게 진행되는 상황이다. 가까운 일본의 경우 신규 댐의 지속적인 개발과 더불어 40여 개의 크고 작

은 재개발 프로젝트가 완료되었거나 계획 중이다. 미국의 경우 미개척국(USBR)이나 미공병단(U.S. Army Corps of Engineers, 이하 USACE)등에서 각 주 단위의 수계별로 재개발 관련 프로젝트를 오래 전부터 실시하여 오고 있다. 특히 80년대 후반에 들어서 USBR은 신규 수자원개발을 포기하고 기존시설의 재개발사업 위주로 정책을 바꾸므로 해서 USBR 주도의 댐 재

* Postdoctoral Research Associate, Dept. of Earth & Environmental Eng., Columbia Univ. New York, NY 10027, U.S.A.
(e-mail: hkwon@uos.ac.kr, hk2273@columbia.edu)

** 서울시립대학교 토목공학과 부교수

*** 삼안건설기술공사 수력부 전문

**** 고려대학교 토목환경공학과 교수

개발 프로젝트가 활발히 진행되고 있다.

국내의 경우 신규 댐의 건설여건 악화로 대체수자원 및 기존 댐 최대 활용방안 등에 의한 수자원 확보가 필요하다. 현재 우리나라의 수자원 개발의 기본방향은 물 부족에 대비한 수자원의 적극개발 추진이다. 그러나 주요 하천의 하상계수가 300 이상으로 강수량의 시간적 분포가 매우 불균일한 지역에서의 수자원 개발은 댐 건설이 중요한 부분을 차지할 것이다. 또한 홍수기에 연간 강수량의 2/3가 집중되기 때문에 홍수피해에 대한 대처방안으로 다목적댐 건설이 필수적이다. 그러나 최근 영월댐 건설의 백지화에서 알 수 있듯이 이제는 대용량의 댐 건설에 의한 수자원 개발은 댐 건설적지의 감소, 환경보전에 대한 인식 증대, 보상비의 증가, 지역 주민의 반대 등으로 거의 한계에 이르렀다. 따라서 중소규모의 댐 건설과 함께 이에 대한 대안으로 지하수 이용, 해수의 담수화 등의 대체수자원 개발과 함께 기존 댐의 연계운영에 의한 효율성 극대화 및 기존 댐을 최대한 활용하는 재개발 방안의 필요성이 대두되고 있다. 이와 같이 기존댐을 재개발하는데 있어서 재개발 규모는 경제성 및 수자원 이용률 측면에서 무엇보다 중요하다 할 수 있다. 저수용량을 결정하기 위해서는 댐의 장기 유입량의 결정이 선결되어야 한다. 그러나 지금까지는 Rippl의 누가곡선방법 등 기존의 유입량이 동일한 기록으로 미래에 반복되리라는 가정 하에 사용되어 왔다. 저수지 규모는 댐 및 취수지점의 유출량을 제대로 평가할 때 그 신뢰성이 보장될 수 있다. 그러나 댐 방류량은 공학적인 신뢰성이 보장되고 있으나 댐의 유입량은 매우 평가하기 어렵다.

이처럼 수자원 확보의 중요성이 증가하고 있는 가운데, 기존 댐으로의 유입량도 댐이 지어질 당시와는 주변 여건의 변화와 최근의 기상이변으로 달라지고 있는 추세이다. 그러므로 현재 운영 중인 댐에 대해서 실측 유입량과 강우량을 바탕으로 저수지유입량 추정 모형을 통한 댐의 계산유입량을 비교해 보고, 이를 모의 발생된 강우량으로 댐의 유입량을 확충하는 방안을 모색하고 이를 바탕으로 저수지 규모의 신뢰성을 평가할 수 있는 방법론을 연구하고자 한다.

국내에서는 저수지의 유입량을 예측할 수 있는 다양한 방법론과 연구가 이루어지고 있다. 유출 모형의 기본 목적은, 유출현상을 예측하기 위한 것으로 치수목적으로 시간 단위의 단기 홍수 사상 모형이, 이수 목적으로는 일 단위 이상의 장기 유출 모형이 주로 사용되고 있으며 이에 대한 연구는 다음과 같다. 노재경(1999)은 가지야마 공식에서 이용되는 유역 특성에 관계되는 계수(f)값을 추정하기 위해서 한국수자원공사에서 운영

하는 18개 지점에서 다목적댐과 용수 전용댐의 27개년 유출 자료를 가지고 f 값의 최적화 방안을 검토하였다. 김윤중 등(2002)은 Mizumura(1995)가 구성한 강우-유출 모형을 유역의 물리적 특성이 반영되는 장점을 유지하면서 미래에 도래할 강우에 적용하여 유출량을 예측할 수 있는 모형으로 개선하고 그 모형의 적합성 여부를 섬진강 유역에 적용하여 검토하였다. 배덕효 등(2002)은 탱크 모형의 매개변수를 추정하는데 유역의 유출특성을 모의할 수 있는 방안을 연구하였다. 서영제(1997)는 우리나라의 금강의 공주와 영산강의 나주 지점에서 탱크모형의 매개변수를 검정하고 설계 당시의 모형을 이용하여 홍수 수문곡선을 유도하여 실측치와 비교하였다. 또한 이를 향후 홍수예정보에 이용할 수 있도록 하였다. 신성철 등(2001)은 일유출량 산정모형으로 Tank 모형의 매개변수 유전자 알고리즘과 Powell 방법을 이용하여 금강 수계 대청댐 지점의 자료를 이용하여 일유출량을 모의하였다.

윤용남 등(1998)은 수치표고모형, 수치 토양도 및 인공위성영상 등을 분석한 토지이용도를 기본 자료로 GIS를 이용하여 소유역별 특성값을 추정하였다. 이를 바탕으로 NWS-PC모형의 매개변수를 추정하고 모형의 보정과정을 통해 적절한 값을 선택하는데 대한 연구를 수행하였다. 강경석 과 서병하(1998)는 SAC-SMA 모형을 통하여 일단위유출량을 확충하고자하는 연구를 수행하였다.

서용원 등(2000)은 대기 중 이산화탄소의 농도가 2배로 증가한 상태의 기후변화를 가정하여 얻은 금강유역의 유출 시나리오를 적용한 대청댐의 저수지 운영모의에 대하여 기술하였다. 운영모의모형은 STELLA를 이용하였고, 모의 방법으로는 한국수자원공사에서 사용중인 대청댐의 월 운영율을 적용하여 각 댐의 발전량, 용수공급, 월류량 등의 변화를 신뢰도(reliability), 회복도(resiliency), 취약도(vulnerability)의 세 가지 기준(performance criteria)로 비교하였다. 최근에 강경석 등(2001)은 동질성 Markov 모형을 통하여 모의된 강우량을 탱크 모형을 이용하여 일 유출량 산정방법을 제시하였으며, 일, 월, 연 유출량을 국내의 주요 유역별로 산정하였다.

이수용량의 측면에서는 현재와 미래의 수자원량이 중요하므로 미래의 하천유출을 예측하는 것이 보다 안정적인 물 공급의 요체가 된다. 따라서, 본 연구에서는 기존댐 재개발에 따른 댐 재개발 최적규모 선택을 위한 방법론을 제시하고자 한다. 최적규모의 분석을 위한 과정은 다음과 같다. 강우량은 비동질성 Markov 모형(nonhomeogenous markov chain)으로 모의 발생하여

비교적 실제 구조에 가깝도록 설계된 토양함수 모형 (Sacramento Soil Moisture Accounting Model, SAC-SMA)과 HEC-1의 Kinematic wave 하도추적 모형을 결합하여 만든 미 기상국의 NWS-PC 모형을 이용하여 유입량으로 변환하였다. 유입량은 저수지 모의 운영을 통하여 저수지의 수위로 환산하여 Hashimoto 등(1982)이 제시한 신뢰성 기준을 바탕으로 재개발 적정규모에 대한 신뢰성 분석을 실시하였다. 그림 1은 최적규모 신뢰성 분석 모의과정을 나타낸다.

2. 본 론

2.1 대상유역

괴산댐은 1957년에 완공되어 사용 연수가 46년이나 경과되어 경제적 수명을 다하고 있으며 부분적으로 개보수가 필요한 실정이다. 괴산댐은 유역면적 671km^2 ,

댐 높이와 길이가 각각 28m, 17m 이고 유효저수용량 약 5.7백만 m^3 이며, 콘크리트 중력식 댐이다.

괴산댐 지역을 대표할 수 있는 기상관측소는 미원, 청천, 입석, 속리산, 복천암 지점의 우량관측소가 위치하고 있다. 이 중에서 30년 이상의 자료가 있는 청천 지역의 강수량 자료를 이용하여 유입량을 산정한다.

소유역 구분은 유역 특성에 따라 대상유역의 수치지도 1:25,000 지도를 사용하여 총 15개의 소유역으로 하천은 1차 하천까지 구분하여 모형을 구축하였다. 모형의 매개변수는 GIS 자료 및 보고서를 참조하여 NWS-PC 모형의 매개변수를 소유역별로 결정하였으며 토양수분 매개변수는 토지이용도, 토양도를 바탕으로 산정하였다. 그림 2는 강우-유출 모의를 위한 소유역 구분 결과를 나타내며 그림 3은 대상유역의 지형을 나타낸다.

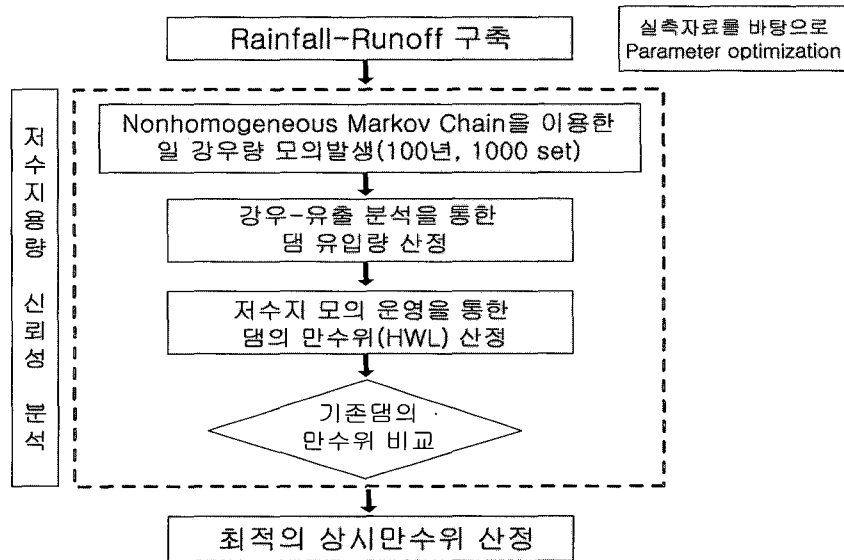


그림 1. 댐 재개발 최적규모 신뢰성 분석

GUI SAN DAM WATERSHED

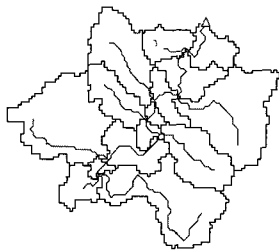


그림 2. 괴산댐 소유역 구분

GUI SAN DAM TOPOLOGY

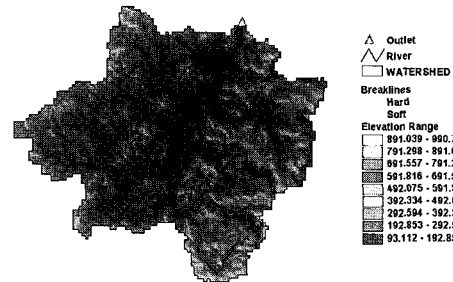


그림 3. 괴산댐 유역 지형

표 1. 괴산댐 유역 및 하도 자료

유역번호	유역길이 (m)	유역경사 (m/m)	유역면적 (km ²)	하천길이 (m)	하천경사 (m/m)
1	8,518.26	0.0720	26.69	6,862.00	0.0024
2	7,172.23	0.0250	24.52	3,954.00	0.0060
3	15,196.09	0.0250	63.54	10,416.40	0.0058
4	10,942.38	0.0310	31.57	7,998.00	0.0025
5	18,051.45	0.0400	105.41	13,944.80	0.0087
6	18,482.69	0.0180	107.85	14,223.60	0.0048
7	4,290.71	0.0240	5.42	6,652.00	0.0146
8	9,317.58	0.0390	19.78	7,293.00	0.0033
9	11,857.17	0.0300	36.58	2,513.00	0.0052
10	3,985.77	0.0140	9.35	11,037.00	0.0040
11	11,031.69	0.0150	36.18	9,712.00	0.0031
12	3,491.38	0.0530	5.56	10,327.00	0.0144
13	13,697.59	0.0320	53.52	2,082.00	0.0079
14	30,823.42	0.0230	102.02	3,815.00	0.0079
15	7,934.55	0.0330	21.95	26,856.00	0.0059

2.2 월강우량 모의 발생

2.2.1 비동질성 Markov 모형

지금까지 Markov 모형은 일강우 모의발생에 대한 모형으로 많이 이용되어왔다. 즉 무강우기간 및 강우기간과 강수량을 특정 확률분포로 가정하여 강수량을 모의발생 시키는 방법을 사용하였다. 그러나 이러한 대부분 모형들은 동질성 Markov 연쇄모형으로 천이확률(강우일에서 무강우일로의 천이 또는 강우일에서 강우일로의 천이와 무강우일에서 강우일로의 천이 또는 무강우일에서 무강우일로의 천이)이 천이발생일(1~365일)에 상관없이 과거의 관측된 자료로부터 크기에 따른 상태 벡터를 구성하여 이에 따른 상태별 천이 빈도수에 따라 구성하였다. 그러나 천이확률은 계절에 따라 변하기 때문에 연중에 다르게 나타날 수 있다는 것에 문제가 있다(문영일 등, 1999). 즉, 강우발생의 과정은 비정상적(nonstationary)이다. 본 연구에서는 비동질성 Markov 연쇄모형의 구조를 근거한 비동질성의 상태, 즉, 천이발생일에 따른 계절의 변동성을 나타낼 수 있는 Markov 연쇄모형을 위해 좀 더 확장된 비매개변수적 Kernel 밀도함수를 이용한 비동질성 천이확률을 구성하였다.

Kernel 밀도함수의 개략적인 개념은 모든 관측치 자료를 이용하여 우리가 관심 있는 날의 천이확률은, 관심 있는 날에 가깝게 발생된 천이사상에 상대적으로 큰 가중치를 주고, 관심 있는 날에서 점점 멀리 떨어질수록 점점 작은 가중치를 주어 기록치에 대한 모든 날에 대하여 천이확률을 구한다. 다음은, 난수($U[0,1]$)를 발생한 후, 천이확률을 이용하여 다음날에 대한 강우상태를 결정할 수 있다. 습윤일에 대한 강우량 또한 난수를

이용하여, 관측된 자료로부터 Kernel 함수 가중치에 의하여 구하였다. 상태 모의발생은 난수를 발생하여 결정하고, 만약에 현재가 강우일(W)이면 현재의 천이확률로부터 다음 날의 강우상태를 아래 그림 4와 같이 모의 발생시킨다.

강우량의 모의발생모형은 one-step의 비동질성 Markov 모형에 대하여 구성하였다. one-step의 2×2 천이확률 행렬을 비매개변수적 핵함수 개념을 적용하여 일별로 부드럽게 변화하는 것으로 가정하였다. 강우발생과정을 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

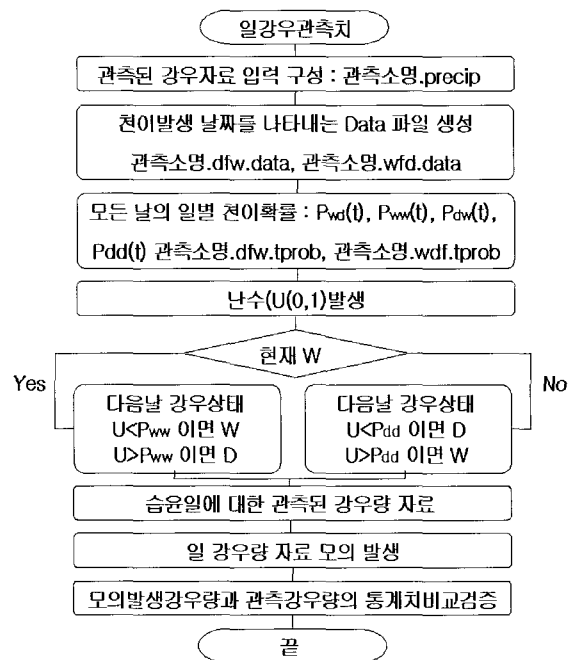


그림 4. 모형의 알고리즘

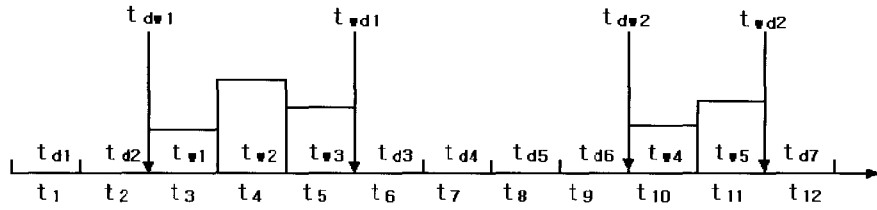


그림 5. 임의의 해에 대한 강수일

일 지수(t)는 1년 중의 1일부터 365일을 나타낸다. 여기서, 일 강우자료로부터 네 종류의 지수로 나눌 수 있다. ① $t_{w_1}, t_{w_2}, \dots, t_{w_{nw}}$ 는 nw 개의 강우일을 나타내고, ② $t_{d_1}, t_{d_2}, \dots, t_{d_{nd}}$ 는 nd 개의 무강우일을 나타내며, ③ $t_{wd_1}, t_{wd_2}, \dots, t_{wd_{nwd}}$ 는 강우일에서 무강우일로 바뀌는 nwd 개의 천이 발생일을 나타낸다. ④ $t_{dw_1}, t_{dw_2}, \dots, t_{dw_{ndw}}$ 는 무강우일에서 강우일로 바뀌는 ndw 개의 천이발생일을 나타낸다. 여기서, 역력 t일의 천이확률 $P_{wd}(t)$ 와 $P_{dw}(t)$ 는 비매개변수적 핵밀도함수 추정치를 이용하여 자료로부터 구한다.

동질성 Markov 모형에서는 천이확률을 단순하게 과거의 자료에서 천이의 수와 과거의 자료에서 강우 또는 무강우의 수에 대한 비율로써 적당히 추정되었으나, 여기서는 핵함수를 이용하여 관심 있는 사상(강우일, 무강우일, 또는 천이일)이 발생되어진 날짜에 핵함수의 중앙이 위치하도록 하여 관심의 대상이 되는 날의 부근에 일어난 사상(즉, 강우나 무강우일 또는 천이상태)은 가중치를 더 주었고, 멀리 떨어져 일어난 사상은 가중치를 덜 주었다. 이에 대한 결과로 천이확률에 대해 핵함수 추정식은 식(1), 식(2)와 같다. 나머지 두 개의 천이확률($P_{uw}(t)$ 와 $P_{dd}(t)$)은 $P_{wd}(t) + P_{uw}(t) = 1$ 과 $P_{dw}(t) + P_{dd}(t) = 1$ 로부터 직접 구할 수 있다.

$$\widehat{P}_{wd}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{nwd} K\left(\frac{t-t_{wdi}}{h_{wd}}\right)}{\sum_{i=1}^{nw} K\left(\frac{t-t_{wi}}{h_{wd}}\right)} \quad (1)$$

$$\widehat{P}_{dw}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{ndw} K\left(\frac{t-t_{dwi}}{h_{dw}}\right)}{\sum_{i=1}^{nd} K\left(\frac{t-t_{di}}{h_{dw}}\right)} \quad (2)$$

$$P_{uw}(t) = 1 - P_{wd}(t) \quad (3)$$

$$P_{dd}(t) = 1 - P_{dw}(t) \quad (4)$$

여기서, n_{wd} 는 과거 자료에서 강우일로부터 무강우일로 바뀌는 천이의 수, n_{dw} 는 과거 자료로부터 무강우일로부터 강우일로 바뀌는 천이의 수, n_d 는 과거의 자료에서 무강우일의 수, n_w 는 과거의 자료에서 강우일의 수이다.

2.2.2 비동질성 Markov연쇄에 의한 강우량 모의 발생

실측 일강우량 자료를 이용하여 월강우량을 비동질성 Markov 모형을 통해 모의 발생하였다. 실측 일강우량은 1967년 1월 1일부터 2002년 12월 31일까지의 청천관측소 지점의 자료를 이용하였다. 모의 발생과정을 통하여 강우량은 100년 자료 1,000번을 모의 발생하였다. 100년 자료 1,000번의 모의된 월강우량을 각각 1사분위값(first quartile), 중앙값(median), 3사분위값(third quartile)을 월별로 추정하여 그림 6~8에 도시하였다.

그림 6은 강우량 자료의 1사분위값을 비교한 그림으로 실측강우량에 비해 작은값을 나타내고 있으며 그림 7의 중앙값의 경우도 실측치보다 약간 작은 추정치를 나타내고 있다. 그림 8은 3사분위값을 나타내며 실측치와 거의 같은 결과를 보여주고 있다.

모의된 강우량이 대상 유역에 적합하기 위해서는 관측자료의 통계적 특성을 지니고 있어야 하며, 이는 모의 발생에 사용된 모형의 적합도를 판단하는 기준이다. 따라서 관측된 강우량 자료의 모집단과 비동질성 Markov 연쇄모형을 이용하여 모의 발생된 강우량 자료의 평균, 표준편차, 최대값을 이용하여 그림 9~11에 도시하였다. 그림 9~11에서 평균, 표준편차, 최대값 모두 변동성은 존재하지만 모두 모의 발생된 강우량과 관측치가 거의 일치하는 결과를 보여주었으며 따라서 실측 강우량의 통계 특성치를 충분히 반영한 모의가 이루어진 것으로 사료되며 신뢰성 분석을 위한 입력 자료로서 활용이 가능하리라 판단된다.

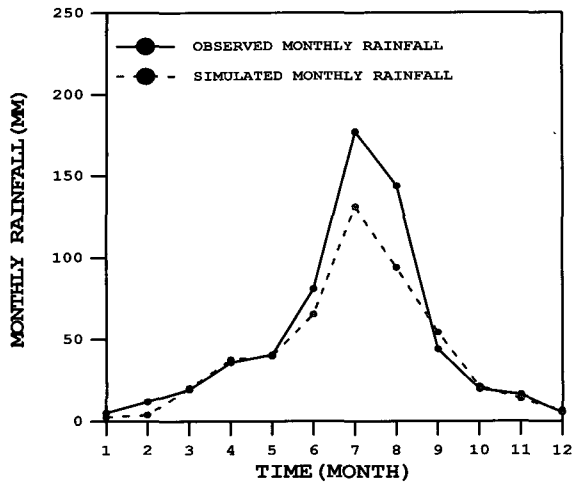


그림 6. 실측강우량과 모의강우량의 1사분위

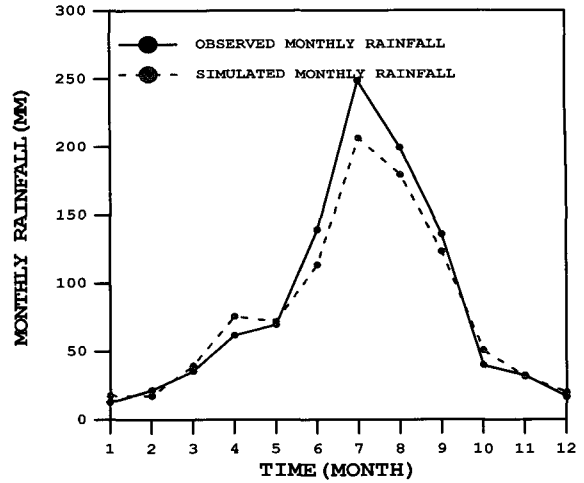


그림 7. 실측강우량과 모의강우량의 중앙값

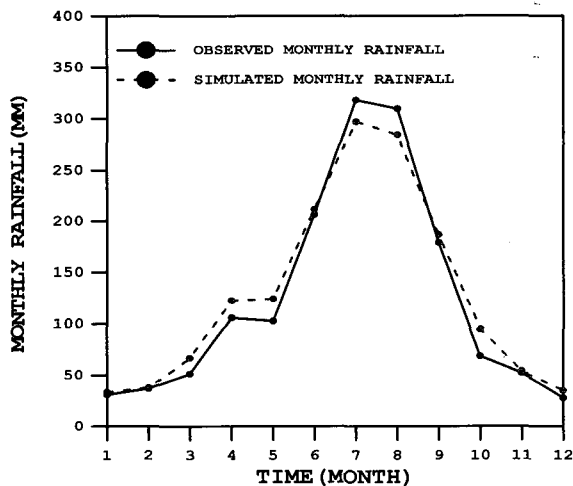


그림 8. 실측강우량과 모의강우량의 3사분위

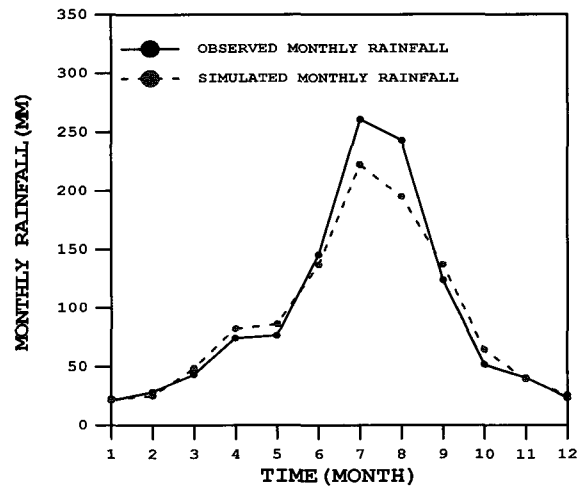


그림 9. 실측강우량과 모의된 강우량의 평균

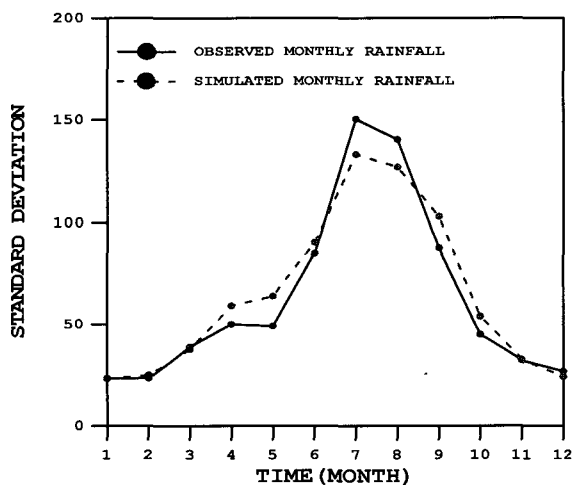


그림 10. 실측강우량과 모의된 강우량의 표준편차

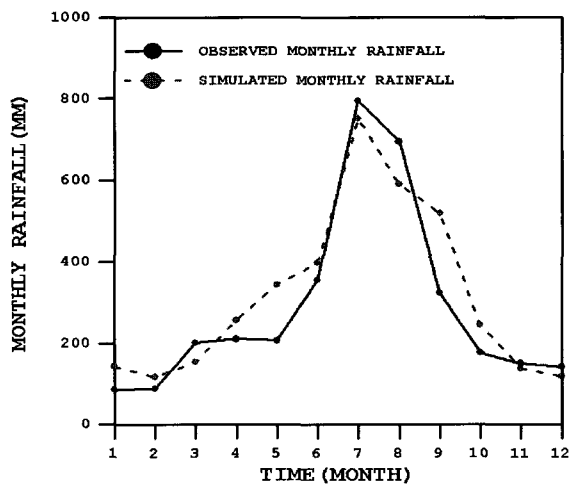


그림 11. 실측강우량과 모의된 강우량의 최대값

2.2.3 모의된 강우량의 검정

일반적으로 모의발생 모형의 타당성 확인을 위해 사용되는 통계적 방법 중에는 검사접근방법이 있으며 모집단의 분포함수에 대한 규정 유무에 따라 매개변수적 검정과 비매개변수적 검정으로 분류되나, 본 논문에서는 매개변수적 검정을 이용하여 통계학적 검정을 실시하였다. 평균과 분산에 대하여 각각 검정하여 두 모집단 간에 동질성을 파악하였다.

(1) 모집단의 평균에 대한 검정

귀무가설(H_0) : 두 개의 모집단의 평균은 동일하다

$$(\mu_1 = \mu_2).$$

대립가설(H_a) : 두 개의 모집단의 평균은 동일하지 않다($\mu_1 \neq \mu_2$).

귀무가설은 두 자료집단에 대하여 통계적으로 차이가 없다고 가정할 때 사용되며, T -통계량에 의하여 검정된다. 독립적인 두 표본 자료를 비교하기 위하여 첫 번째 표본 x_1 의 크기를 n_1 , 그리고 표준편차를 s_1 이라 하고 두 번째 표본 x_2 의 크기를 n_2 , 표준편차를 s_2 라고 한다면 가설에 대한 검정통계량으로서 두 자료집단의 T -통계량은 다음 식 (5)와 같다.

$$T = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (5)$$

여기서, s_p 는 공통분산에 대한 결합추정량이며 두 표본분산의 가중평균에 의해 추정되고 다음 식(6)으로 추정할 수 있다.

$$s_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (6)$$

식(5)와 식(6)을 이용하여 자유도가 $n_1 + n_2 - 2$ 인 T -통계량을 구할 수 있고 예측자료의 통계적 특성이 관측 자료의 특성과 동일여부를 조사할 수 있다. 가설에 대한 의사결정규칙은 유의수준 $\alpha\%$ 내에서 다음과 같이 정의한다.

$$|T| > T_{\alpha/2} \text{ 이면 } H_0 \text{ 를 기각한다.}$$

(2) 모집단의 분산에 대한 검정

귀무가설(H_0) : 두 개의 모집단의 분산은 동일하다.

$$(\sigma_1^2 = \sigma_2^2)$$

대립가설(H_a) : 두 개의 모집단의 분산은 동일하지 않다. ($\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$)

검정통계량은 다음 식(7)과 같다.

$$F_c = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (\text{단, } s_1^2 > s_2^2) \quad (7)$$

$$s_1^2 = \frac{\sum(X_1 - \bar{X}_1)^2}{n_1 - 1}, \quad s_2^2 = \frac{\sum(X_2 - \bar{X}_2)^2}{n_2 - 1} \quad (8)$$

$F_c > F_{df_2}^{df_1}(\alpha)$ 이면 H_0 를 기각한다.

여기서, 자유도는 $df_1 = n_1 - 1$, $df_2 = n_2 - 1$ 이며 $F_{df_2}^{df_1}(\alpha)$ 는 유의수준 α 의 F 분포도에서 임계치값이다. 청천관측소의 실측 강우량 자료와 비동질성 Markov 연쇄에 의해 모의 발생한 강우량의 평균을 이용하여 유의수준 5%에 대해 T -test와 F -test를 수행하였다.

표 2와 같이 T -test 결과 유의수준 5%에서 모의된 자료에서는 8월의 모의 강우량이 기각되었으며 F -test 결과 모의된 자료에서 기각되지 않았다. 따라서, T -test와 F -test의 분석 결과 모의 발생한 강우량 자료를 이용하여 모의를 수행하여도 유의한 결과를 나타낼 것으로 사료되며 비동질성 Markov 모형은 연중 천이확률이 변할 수 있다는 것을 인정한 비동질성 모형으로서 관측된 강우량의 확률분포를 특정 확률분포로 가정하지 않고 관측자료의 확률분포를 이용하여 강우량을 모의 발생할 수 있다.

2.3 유량 모의

2.3.1 NWS-PC

미국 국립기상국(National Weather Service)의 수문 예측 사업그룹은 강수, 눈의 축적과 융설, 토양 함수상태의 계산, 유출의 하도추적, 매개변수 최적화 등의 유출 예측체계를 컴퓨터 프로그램화하여 NWSRFS(National Weather Service River Forecast System)을 개발하였다. 이 NWSRFS의 최종 모형은 프로그램의 크기가 커서 주전산기만을 사용해야 수행 될 수 있다. 그런데 최근의 컴퓨터 이용 추세는 주전산기에서 개인용

표 2. 청천관측소 실측 강우량과 모의 강우량과의 동질성 검정 결과

월	T-test		F-test		비고
	모의자료의 평균 검정		모의자료의 분산 검정		
1월	0.331	임계치: 1.960	0.98	임계치: 1.72	
2월	0.790		1.14		
3월	0.834		0.94		
4월	0.837		1.39		
5월	0.912		1.69		
6월	0.597		1.13		
7월	1.731		0.78		
8월	2.262		0.82		
9월	0.752		1.38		
10월	0.255		1.03		
11월	0.599		0.81		
12월	1.102		0.599		reject

컴퓨터로 바뀌어가고 있으므로, NWS에서도 이러한 추세에 맞추어 NWSRFS의 축소 모형인 NWS-PC (Tabios III 등, 1986)를 개발하였다. NWS-PC는 NWSRFS의 SAC-SMA와 HEC-1의 운동과 추적 프로그램을 조합하여 구성되었으며 추적방법의 대안으로 단위도와 Muskingum 방법을 결합하여 적용할 수 있도록 작성되었다. NWS-PC에서 SAC-SMA의 모형 보정은 수동 및 자동 보정을 조합하여 수행할 수 있으며 Rosenbrock 제약 최적화 기법을 사용한다.

2.3.2 NWS-PC 매개변수 검정 및 검증

NWS-PC 모형에서 일 유출량을 모의하기 위해 필요한 매개변수에는 토양함수 상태를 모의하는 SAC-SMA 모형의 매개변수와 유역의 지표 및 지하와 하도에서의 흐름을 추적하는 운동과 추적법 또는 단위도-Muskingum 추적법의 매개변수가 있으며 장기유출량을 결정하기 위한 토양수분과 관련된 매개변수의 추정 필요적이다. SAC-SMA의 매개변수를 추정하는 데는 수치지도 중에서 토지 이용도와 토양도를 이용하였다. 토지

이용도와 토양도는 다음 그림 12와 그림 13과 같다.

1971년부터 1981년까지의 월강우량과 월유출량 자료를 이용하여 매개변수를 검정(calibration)을 실시하였으며 그림 14에 나타내었다. 1981년부터 2002년까지 실측유출량을 바탕으로 검증(verification)을 실시하였으며 그림 15에서 보듯이 실측치와 계산치의 거의 유사한 거동을 나타내고 있다.

일반적으로 강우-유출 모형의 정확성을 평가하기 위한 많은 통계적 적합도 기준이 제안되었으나, 적합도 기준보다는 모의 발생된 값과 측정된 값 사이의 불일치에 더 중점을 두고 있다. 즉 관측치와 예측치 사이의 차이인 잔차의 분석이 계통적으로 과소 또는 과대 추정되는 것을 파악하여 모형 수행능력을 평가하는데 사용되고 있다. 본 논문에서는 통계적 평가 수단으로 평균제곱오차(root mean square error, RMSE), 모형효율성계수(model efficiency, ME), 상관계수(correlation coefficient, CC), 첨두유량의 퍼센트 오차(percent error in peak, PEP)를 사용하여 모형의 적합성을 평가하였다.

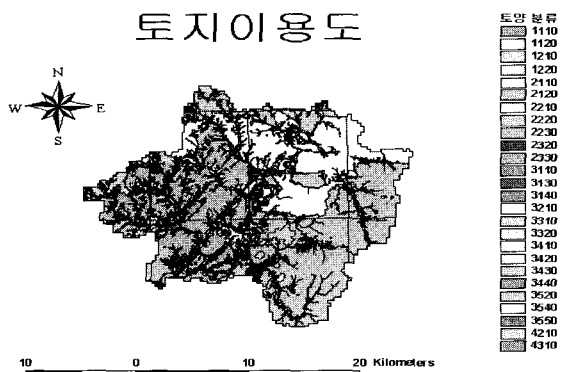


그림 12. 토지이용도 현황

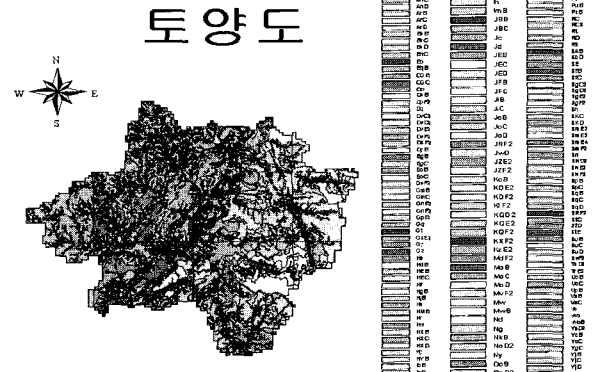


그림 13. 토양도 현황

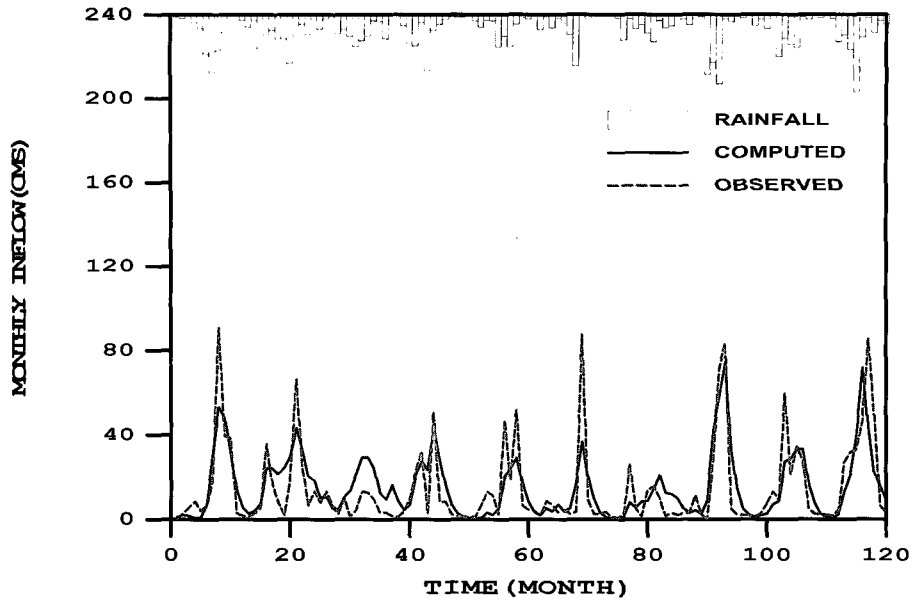


그림 14. NWS-PC 모형의 매개변수 검정 결과(1971년~1981년)

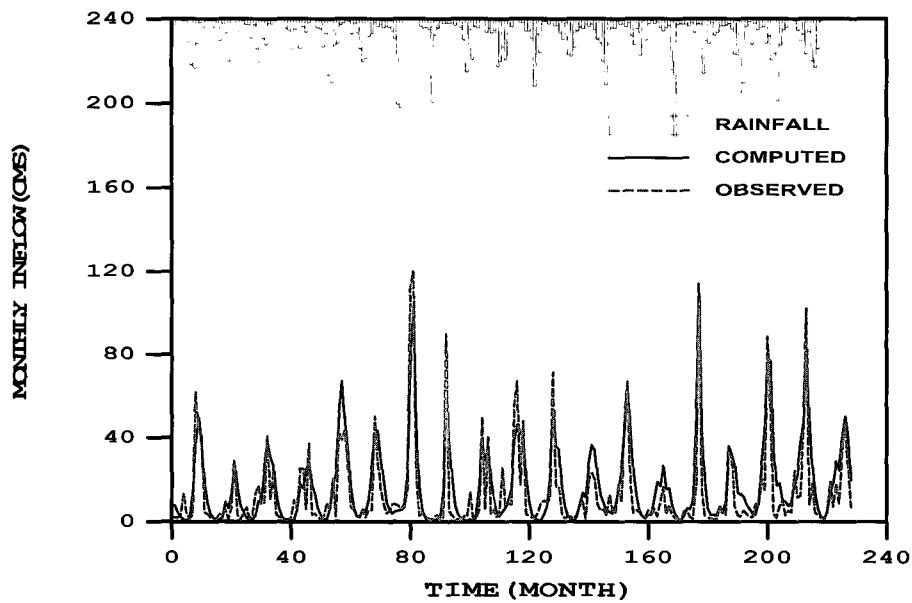


그림 15. NWS-PC 모형의 매개변수 검증 결과(1982~2002년)

평균제곱오차는 모형의 수행결과를 평균적으로 어느 정도의 유량만큼 오차가 발생하는지를 나타내는 지표로 일종의 평균치라고 할 수 있다. 여기서, q_0 는 실측유량을 q_s 는 모의 유량을 나타낸다.

$$SE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_0(t) - q_s(t))_i^2 \right)^{0.5} \quad (9)$$

모형효율성계수는 통계적 기준으로 편의를 줄일 수

있는 무차원계수이다. 모의된 수문곡선이 실측 수문곡선과 잘 일치할수록 1에 가까워지는 성질이 있다. 이 기준은 무차원양으로서 자료의 개수에 관계없이 절대적 평가기준이 될 수 있다.

$$ME = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2} \quad (10)$$

$$F^2 = \sum_{i=1}^n [q_0(t) - q_s(t)]_i^2 \quad (11)$$

$$F_0^2 = \sum_{i=1}^n [q_0(t) - \bar{q}]^2 \quad (12)$$

여기서, q_0 는 실측유량을 q_s 는 모의 유량을 나타낸다.

침투유량의 퍼센트오차는 침투유량이 중요한 사상형 강우-유출 모형에 주로 이용되며 이 값이 음수이면 모의된 침투유량이 더 작음을 의미하며, 침투시간이 고려되지 않는 단점이 있다.

$$PEP = \frac{q_{ps} - q_{p0}}{q_{p0}} \times 100 \quad (13)$$

여기서, q_{p0} 는 실측유입량의 침투유량을 나타내며 q_{ps} 는 모의치의 침투유량을 나타낸다.

상관계수는 모형의 효율성을 나타내는 무차원 기준으로 1에 근접할수록 모형의 모의능력이 우수함을 뜻한다.

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (q_o(t) - \bar{q}_o)(q_s(t) - \bar{q}_s)}{(n-1)} \quad (14)$$

4 가지의 통계적 지표를 바탕으로 피산댐의 유입량 추정결과를 평가하였으며 본 논문에서 제시한 NWS-

PC 외에 기존 장기유입량 추정에서 많이 사용되는 가지야마, Tank 모형들을 같이 평가하여 비교 검토하였다.

표 3과 같이 실측유입량과 모형을 통해 계산된 유입량간의 통계적 지표를 추정하였으며 통계적 지표를 살펴 보았을 때, 가지야마 모형은 실측치와 많은 차이를 나타내고 있다. 또한 Tank 모형의 경우에는 비교적 적합한 결과를 나타내고 있으나 3가지 모형 중에서는 NWS-PC 모형이 가장 실측치에 근접한 결과를 나타내고 있다.

2.3.3 저수지 유입량의 모의

100년 자료를 1,000번 모의한 강우량을 피산댐으로의 유입량 자료로 변환시킨다. 모의된 강수량을 바탕으로 100년씩 NWS-PC 모형에 의해서 피산댐 저수지 유입량을 추정한 결과 평균과 분산 모두 1월에서 8월 사이에서는 관측치보다 약간 작게 추정되었으며 9월 이후에서는 실측치에 비해 약간 큰 유량으로 모의가 이루어졌다.

2.4 저수지 모의운영

저수지의 용수공급능력 및 댐 규모를 결정하기 위하여 저수지 모의운영기법을 많이 사용하고 있다. 저수지 모의운영기법은 다음과 같은 물수지 이론식 (15)에 근거를 두고 있으며 월별로 추정이 가능하도록 프로그램

표 3. 강우-유출관계의 통계적 지표

유입량 추정방법	ME (-)	CC (-)	PEP (%)	RMSE (CMS)
가지야마	-207.82	0.89	3.76	69.36
NWS-PC	0.74	0.84	-0.05	11.52
Tank 모형	0.35	0.86	0.43	11.59

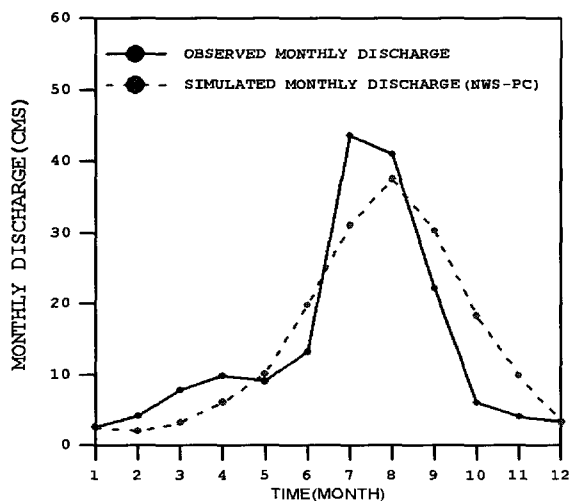


그림 16. 실측유량과 모의유량의 평균 비교

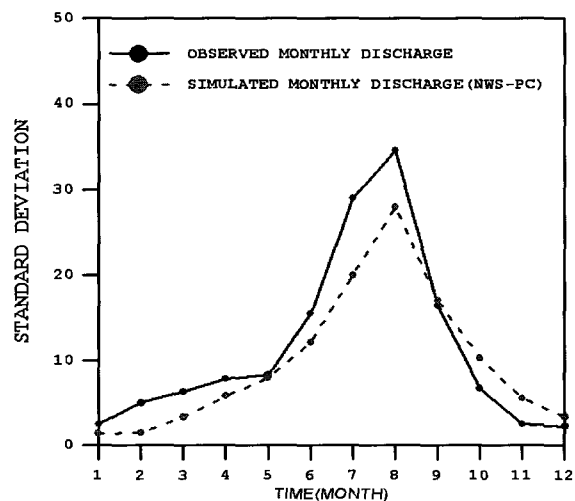


그림 17. 실측유량과 모의유량의 표준편차 비교

을 작성하여 모의를 실시하였다. 과거 유입량 자료를 토대로 댐 건설후의 실제 저수지 운영과 동일한 조건으로 용수공급량, 하천방류량, 저수지 수면증발량 등을 고려할 때 저수지의 수위기간별로 어떻게 변동하는지를 분석 검토하여 적정 저수지 규모를 결정하게 된다.

$$S = \sum (S_U + S_f + E_V - I_N) / \Delta T \quad (15)$$

여기서, S 는 유효저수용량, S_U 는 용수공급량을 S_f 는 하류보장유량(하류에 일정량을 항상 유지 시켜야 하는 유량)을 나타내며 E_V 는 저수지수면증발량, I_N 은 유입량을 ΔT 는 모의운영단위시간을 나타낸다. 댐의 용수공급능력을 평가하는 기준으로는 기록에 나타난 최악의 갈수시에도 용수공급이 가능한 보장공급량 기준과 전체 계획기간 중에서 일정기간 동안은 용수공급의 부족을 허용하여 평가하는 신뢰도 기준으로 나누어진다. 기존 댐들은 대부분 보장공급량 또는 이와 유사한 기준에 의해서 평가되어 왔으나, 최근의 댐 계획에서는 일정기간 물 부족을 허용하는 신뢰도 기준에 의해서 평가하는 방향으로 바뀌어가고 있다. 최적 재개발댐의 규모화 용수공급량을 결정하기 위하여 저수지의 상시만수위를 여러 가지로 설정한 후, 각 상시만수위별로 용수공급량을 여러 가지로 가정하여 저수지 모의운영을 실시하였다.

여기서, 저수면적 및 저수용량 곡선은 괴산댐 재개발 타당성 보고서(한국개발연구원, 2002)를 참조하여 결정하였으며 유입량은 NWS-PC를 통해 모의를 실시하였다. 또한 괴산댐의 저수지 수면증발량을 산정하기 위하여 적용된 계기증발량은 본 유역에 가장 인접한 충주 기상관측소의 1972~1990년 동안 소형 증발접시에 의해 기록된 평균치를 사용하였으며 수면증발량은 표 4와 같이 계기 증발량에 월별 계수를 곱하여 산정하였다.

2.5 댐의 적정 규모를 위한 신뢰성 분석

저수지의 규모의 신뢰성을 분석하기 위해서 비동질성 Markov 모형을 통해서 모의 발생시킨 강우량 자료를 NWS-PC 모형으로 월단위의 유입량을 산정하였다. 강우량은 100년 자료 1,000번을 모의 발생하여 유입량으로 환산하였다. 신뢰성을 판단하는 기준으로서 Hashimoto 등(1982)이 정의한 신뢰성 기준을 통하여 검토를 실시하였다.

여기서 3가지 기준이 적용되는데 첫째, 신뢰도(reliability)가 있으며 이는 시스템의 운영상의 문제가 발생하지 않는 시간을 나타내며 총 모의운영시간과 시스템의 파괴가 발생하지 않은 시간의 비로 정의될 수 있다. 둘째로, 회복도(resiliency)가 있으며 이는 시스템의 파괴로부터 회복되는 시간으로 정의되며 파괴가 발생한 시간과 파괴까지 이르는 시간까지의 비로 나타낼 수 있다. 마지막으로, 취약도(vulnerability)가 있으며 이는 시스템의 파괴가 발생한 경우의 크기를 나타낸다. 식 (16)~(18)은 신뢰성 평가기준을 의미한다.

$$\text{신뢰도} = \frac{\text{시스템의 파괴가 발생하지 않은 시간}}{\text{총 모의시간}} \quad (16)$$

$$\text{회복도} = \frac{\text{시스템의 파괴가 발생한 시간}}{\text{시스템의 파괴까지이르는 시간}} \quad (17)$$

$$\text{취약도} = \text{시스템의 파괴 크기} \quad (18)$$

그림 18에서 보듯이 상시만수위 150ELM를 시점으로 80%이상의 신뢰도를 나타내고 있어 대체적으로 댐의 신뢰도는 높은 것으로 사료되며 상시만수위가 증가할수록 신뢰도의 기울기가 작아지는 결과를 나타내고 있으며 이는 수위의 증가에 따른 민감도가 작은 것을 의미한다. 즉 댐의 높이를 특정 높이 이상으로 높더라도 댐의 이수 측면에서의 신뢰도에 영향은 크지 않다고 할 수 있다.

그림 19는 댐의 신뢰성 평가 중 회복도를 나타내며 지수의 특성상 신뢰도와는 반대로 지수적으로(exponential) 감소하는 결과를 보이고 있으며 신뢰도와 같이 상시만수위가 증가할수록 회복도의 기울기가 작아지는 경향을 나타내고 있다.

그림 20은 댐의 취약도를 나타낸 것으로서 상시만수위가 높아질수록 일정구간 증가하다가 유지되는 경향을 나타내고 있으며 이는 상시만수위가 높아짐에 따라 신뢰도 및 회복도는 개선되는 반면에 취약도 즉 가뭄이 발생하면 부족량이 증가하다가 일정 수준을 유지하는 것을 의미한다. 그러나 일반적으로 가뭄에서 부족량 보다는 가뭄이 발생하는 기간이 중요하게 인식되고 있으며 이런 관점으로 보면 신뢰도와 회복도가 보다 중요한 의미로서 고려될 수 있을 것으로 사료된다.

표 4. 괴산댐 유역의 증발산량

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	계
계기증발량	33.3	41.5	71.3	114.0	138.6	140.3	124.0	117.8	93.8	70.2	41.3	31.3	1,013.6
월별 계수	1.37	1.10	0.55	0.43	0.43	0.42	0.54	0.61	0.66	0.82	1.16	1.41	
수면증발량	45.6	45.7	39.1	49.0	59.6	58.9	65.0	71.9	61.9	57.6	47.9	44.1	1,013.5

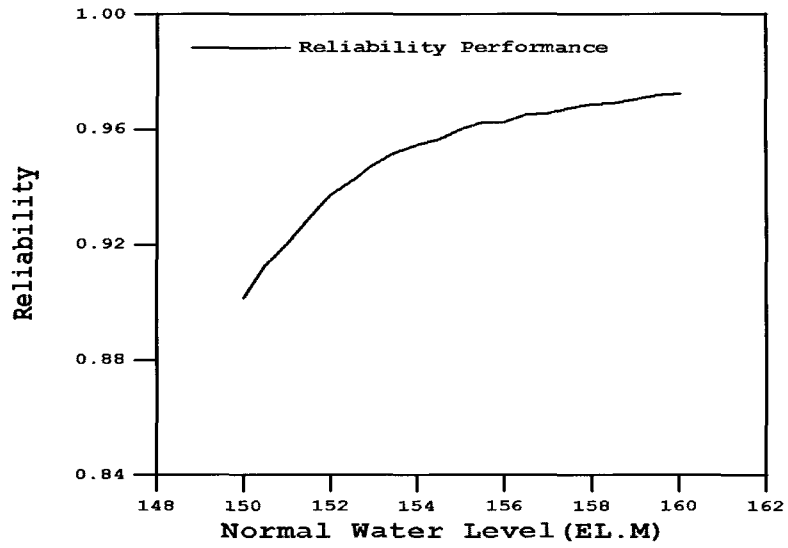


그림 18. 신뢰도 평가 결과

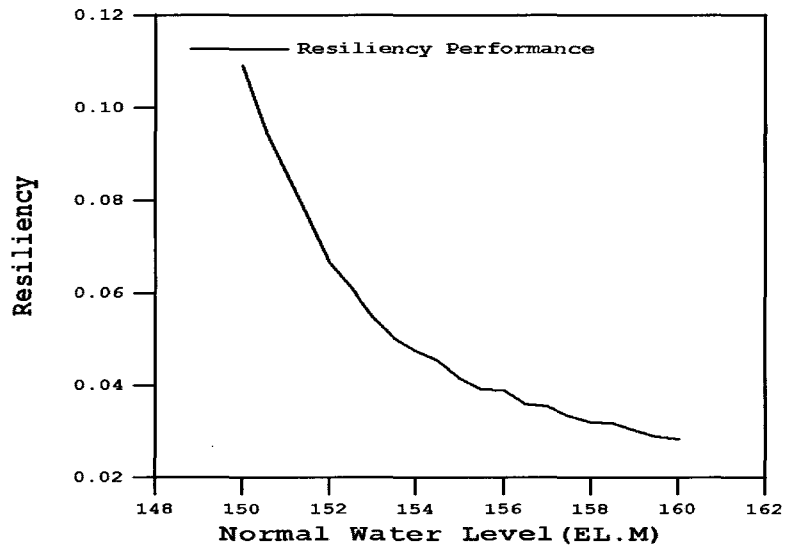


그림 19. 회복도 평가 결과

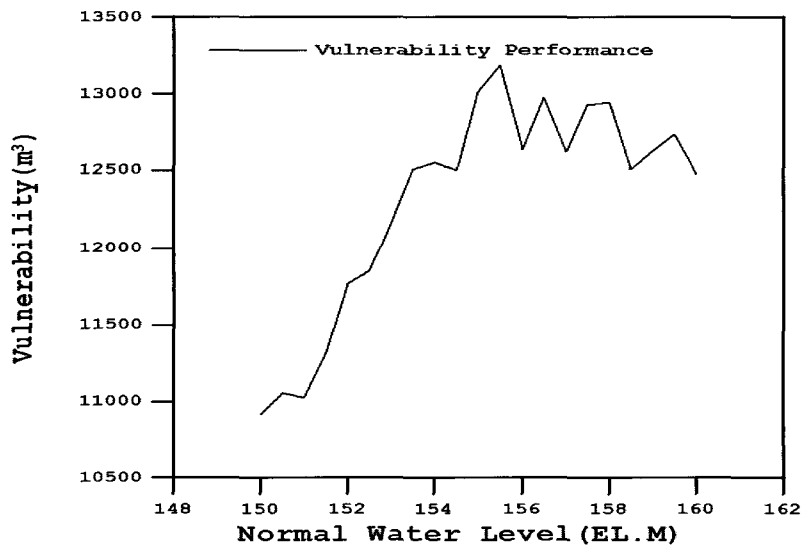


그림 20. 취약도 평가 결과

표 5. 신뢰성 분석 결과

상시만수위 (EL.M)	신뢰도	회복도	취약도 (m ³)
150.0	0.902	0.110	10,912
150.5	0.913	0.096	11,056
151.0	0.921	0.085	11,025
151.5	0.929	0.076	11,319
152.0	0.938	0.067	11,768
152.5	0.943	0.061	11,857
153.0	0.948	0.055	12,152
153.5	0.952	0.050	12,504
154.0	0.955	0.048	12,552
154.5	0.957	0.045	12,498
155.0	0.960	0.042	13,010
155.5	0.962	0.039	13,186
156.0	0.963	0.039	12,637
156.5	0.965	0.036	12,975
157.0	0.966	0.036	12,620
157.5	0.968	0.034	12,927
158.0	0.969	0.032	12,944
158.5	0.970	0.032	12,505
159.0	0.971	0.030	12,631
159.5	0.972	0.029	12,733
160.0	0.973	0.028	12,478

표 5는 상시만수위에 따른 신뢰성 평가결과를 나타낸다. 따라서 댐의 신뢰성 평가만을 고려해 볼 때 특정한 수위를 기준으로 뚜렷한 변환점을 추정하기는 곤란하지만 3가지 기준을 고려해보면 대략적으로 155EL.M을 중심으로 3가지 지수가 수렴하는 결과를 보이고 있으며 따라서 이수용량 설정기준인 상시만수위로서 적합한 것으로 판단되나, 일반적으로 댐의 경우 지리·환경적 요인과 경제성이 댐의 높이를 결정하는데 중요한 요소로 작용하기 때문에 이에 대한 검토가 함께 이루어져야 할 것으로 사료된다.

3. 결 론

기존댐을 재개발하는데 있어서 재개발 규모는 경제성 및 수자원 이용률 측면에서 무엇보다 중요하다 할 수 있다. 저수용량을 결정하기 위해서는 댐의 장기 유입량의 결정이 선결되어야 한다. 그러나 지금까지는 Rippl의 누가곡선방법 등 기존의 유입량이 동일한 기록으로 미래에 반복되리라는 가정 하에 사용되어 왔다. 저수지 규모는 댐 및 취수지점의 유출량을 제대로 평가할 때 그 신뢰성이 보장될 수 있다. 그러나 댐 방류량은 공학적인 신뢰성이 보장되고 있으나 댐의 유입량은 매우 평가하기 어렵다.

이수용량의 측면에서는 현재와 미래의 수자원량이 중요하므로 미래의 하천유량을 예측하는 것이 보다 안

정적인 물 공급의 요체가 된다. 따라서, 본 연구에서는 기존댐 재개발에 따른 댐 재개발 최적규모 선택을 위한 방법론을 제시하고자 한다. 최적규모의 분석을 위한 과정은 다음과 같다. 강우량은 비동질성 Markov 모형으로 모의 발생하여 비교적 실제 구조에 가깝도록 설계된 미 기상국의 NWS-PC 모형을 이용하여 유입량으로 변환하였다. 유입량은 저수지 모의운영을 통하여 저수지의 규모를 결정하였다. 또한 Monte Carlo 기법을 이용하여 현재 저수지 이수용량과 모의된 용량과 비교하여 재개발 적정규모에 대한 신뢰성 분석을 실시하였다.

저수지의 규모의 신뢰성을 분석하기 위해서 비동질성 Markov 모형을 통해서 모의 발생시킨 강우량 자료를 NWS-PC 모형으로 월단위의 유입량을 산정하였다. 강우량은 100년 자료 1,000번을 모의 발생하여 유입량으로 환산하였다. 신뢰성을 판단하는 기준으로서 Hashimoto 등 (1982)이 정의한 신뢰성 기준을 통하여 검토를 실시하였다. 댐의 신뢰성 평가만을 고려해 볼 때 특정한 수위를 기준으로 뚜렷한 변환점을 추정하기는 곤란하지만 3가지 기준을 고려해보면 대략적으로 155EL.M을 중심으로 3가지 지수가 수렴하는 결과를 보이고 있으며 따라서 이수용량 설정기준인 상시만수위로서 적합한 것으로 판단된다.

따라서 재개발 대상댐에 대해서 개발 규모를 결정하는 보완수단으로서 본 논문에서 제시한 방법론의 적용이 가능하리라 사료되며 또한 신규댐에 대해서도 양질

의 수문자료가 확보된다면 본 연구에서 제시한 방법론의 적용이 가능하며 확정론적인 기존 해석방법과 병행하여 비교검토가 이루어진다면 보다 효율적인 수자원 관리가 가능하리라 사료된다. 그러나 본 논문에서 제시한 결과만을 가지고 댐의 이수용량을 결정하는 것은 무리가 따르며 일반적으로 댐의 경우 지리·환경적 요인과 경제성이 댐의 높이를 결정하는데 중요한 요소로 작용하기 때문에 이에 대한 검토가 함께 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-4-1)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 한국개발연구원 (2002). **괴산댐 재개발 사업 예비타당서조사 보고서**.
- 문영일, 서병하, 정상만, 김형수, 차영일, 박대형 (1999). “비동질성 Markov모형에 의한 일 강우량 모의발생”, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 22-27.
- 강경석, 서병하 (1998). “SAC-SMA 모형을 이용한 일 유출량 산정”, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 146-152.
- 강경석, 이동률, 김명립, 차형선 (2001). “탱크모형을 이용한 장기 일 유출량 자료 구축”, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 245-250.
- 김운중, 김민환, 전일권 (2002). “감수곡선을 이용한 탱크 모형과 매개변수 자동보정에 의한 유출 예측”, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제6-B호, pp. 777-784.
- 노재경 (1999). “가지야마 월 유출량 공식의 일반화”, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 221-226.
- 배덕효, 정일원, 강태호 (2002). “유역 유출특성을 고려한 매개변수 추정에 관한 연구”, **대한 토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 38-41.
- 서영제 (1997). “탱크모형의 매개변수 검정에 관한 연구”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회 제30권, pp. 327-334.
- 서용원, 이승현, 김영오, 이동률 (2000). “대청댐 운영에 대한 기후변화 영향평가”, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 427-430.
- 신성철, 강경석, 서병하 (2001). “Tank Model의 매개변수 최적화에 관한 연구”, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 158-163.
- 윤용남, 유철상, 안재현, 양인태, 고덕구 (1998). “댐건설 전후 유역의 장기유출특성변화의 분석 1. GIS를 이용한 NWS-PC 모형의 매개변수추정”, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제18권, 제II-5호, pp. 449-459.
- Tabios III, G., Obeysekera, J.T., and Salas, J.D. (1986). *Hydrology and Water Resource Program*, Colorado State University, Ft Collins, Colorado.

(논문번호:04-80/접수:2004.08.16/심사완료:2005.01.04)