

# 저수관리를 위한 댐의 월유입량 예측

## Forecasting Monthly Inflow for the Storage Management of Small Dams

지용근\*, 김선주\*\*, 김필식\*\*\*

Yong Geun Jee, Sun Joo Kim, Phil Shik Kim

### 요 지

도시발달과 인구증가로 인해 오늘날의 수자원 관리와 계획은 복잡하고 그 중요성은 더욱더 커지고 있으며, 인구와 재산의 집중현상으로 인하여 사소한 수문재해로 인해 막대한 인명과 재산피해를 초래될 수 있다. 이런 이유들로 인해 정확한 수문예측과 이를 통한 적절한 수자원 관리는 그 어느 때보다 중요한 인자로 인식되고 있다. 본 연구에서는 수문예측을 통한 소규모 댐으로의 정확한 월유입량 예측을 실시하여 실측유입량과 비교·분석함으로써 수자원관리의 효율성을 향상시키고자 하였다.

수문예측을 위해서 확률론적 예측이 가능한 앙상블 예측기법(Ensemble Prediction Method)을 적용하였으며 과거 1968~1997년까지의 강우데이터와 수정 TANK모형을 이용하여 1998년부터 2002년까지의 성주댐의 월유입량 앙상블을 생성하였다. 수문예측뿐만 아니라 유입량예측의 정확성을 향상시키기 위해 수정 TANK모형의 매개변수를 최적화기법 중의 하나인 유전자알고리즘을 이용하여 매개변수를 최적화하였으며 평창강유역과 보청천유역의 실측데이터를 이용하여 모형의 검증 실시하였다. 또한 강우발생시 과소하게 유출량이 산정되는 것을 보완하기 위해 매개변수를 평수기와 홍수기로 구분하여 모형을 적용하였다.

본 연구에서 제시된 앙상블 예측기법과 최적화된 수정 TANK모형을 이용하여 댐의 수자원을 관리한 다면 효율적인 관리가 이루어질 것으로 판단된다.

**핵심용어 : 앙상블 예측기법, 수정 TANK모형, 유전자 알고리즘, 자동보정**

### 1. 서 론

수문학적 예측은 중장기와 단기예측으로 구분할 수 있다. 보통 단기예측은 확정론적 강우-유출 모형과 연계하여 홍수조절에 사용되며 장기예측은 확률론적 모형과 연계하여 사용된다. 우리나라에서는 단기예측이나 실시간 홍수예측에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있지만 상대적으로 월 단위 이상의 장기 용수공급과 저수지 관리를 위한 중장기 유량예측에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

확률론적 예측정보의 필요성은 Missouri와 Mississippi강 유역에서 1993년 발생한 대홍수를 계기로 확대되었다. NOAA의 재난조사연구팀은 1994년 사건조사를 통해, 한정된 값을 사용하는 확정론적 예측의 한계성에 대해 언급하였으며 확률론적 예측의 필요성을 강조하였다(Krzysztofowicz, 2001).

본 연구에서는 저수지 통합관리 시스템을 개발하는데 있어서 장기적인 수자원 관리를 위한 장기유입량예측을 하고자 하였다. 장기유입량을 예측하기 위해 앙상블예측 기법을 이용하여 성주댐의 월 유입량 앙상블을 생성하고, 여기에 기상확률예보를 이용하기 위해 PDF-Ratio방법을 적용하여 그 실용성을 검증하고자 하였다. 강우-유출모형으로는 유전자알고리즘을 이용하여 매개변수를 최적화한 수정 TANK모형을 사용하였다. 또한 수정 TANK모형으로 장기유출을 모의할 때 많은 양의 강우가 발생하면 유출이 과소하게 산정되는 것을 보완하기 위해 매개변수를 평수기와 홍수기로 구분하여 최적화하였다.

\* 정회원-건국대학교 대학원 사회환경시스템공학 전공-E-mail : ykjee77@konkuk.ac.kr  
\*\* 정회원-건국대학교 생명환경과학대학 교수-E-mail : sunjoo@konkuk.ac.kr  
\*\*\* 정회원-건국대학교 생명환경과학대학 Post Doc.-E-mail : kimps@konkuk.ac.kr

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상지구 및 적용방법

양상불 예측의 적용성 검토를 위해 성주댐 유역을 연구대상으로 선정하였다. 우리나라와 같이 강우자료가 유량자료보다 일반적으로 풍부한 경우 양상불 예측을 이용하면 강우자료만큼의 유량 자료를 생성할 수 있다는 장점을 살릴 수 있다. 성주댐은 1987년 12월에 착공하여 1998년 12월에 완공되었으며 1998년부터 유입량이 실측 되었다. 성주댐 유역의 강우자료는 1908년부터 존재하므로 양상불 예측을 적용하기에 적당한 대상이라고 할 수 있다(그림 1, 표 1).

표 1. 성주댐 저수 현황

유역면적 (m <sup>2</sup> )	몽리면적 (m <sup>2</sup> )	저수량 (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	만수면적(m <sup>2</sup> )		만수위(EL.m)		사수위 (EL.m)
			여름	겨울	여름	겨울	
149,600	31,600	38,240	1,830	2,050	184.7	187.9	162.0

본 연구에서는 첫 번째, 수정 TANK모형의 매개변수를 강우 발생 시 과소하게 산정되는 모형의 단점을 보완하기 위해 평수기와 홍수기로 매개변수를 구분한 후 유전자알고리즘을 이용하여 최적화하였고 둘째, 최적화 된 모형을 평창강유역과 보청천유역의 실측유출량과 모의유출량을 비교하여 보정과 검증을 실시하였다. 셋째, 수정 TANK모형을 이용하여 1998~2002년까지 5년간의 예측을 실시하여 예측유입량 양상불을 생성하고 이를 실측유입량과 비교·검토하였다. 1968년부터 1997년까지의 30개의 강우자료를 수정 TANK모형에 입력하여 예측년도(1998~2002)의 매월마다 30개의 유입량 양상불을 생성하였다. 수정 TANK모형을 초기화하기 위해 예측하고자 하는 월 이전의 과거 강우자료를 입력하였다. 다음으로 PDF-Ratio방법을 이용하여 각 유입량 시나리오에 해당하는 가중치를 각각 구하여 성주댐의 월유입량을 예측하고 성주댐의 효율적인 수자원관리 방안을 제시하고자 하였다.



그림 1. 대상지구(성주댐)

### 2.2 유전자 알고리즘

유전자알고리즘은 미지수 함수  $Y=G(x)$ 의 최적해를 발견하는 모의진화형 탐색알고리즘의 성격을 가지고 있는 알고리즘으로 John Holland(1975)에 의해 처음으로 소개되었다. 유전자알고리즘은 그 개념과 이론이 단순하고, 해의 탐색능력이 우수하여 여러 분야의 최적화에 적용되고 있으며 복잡한 해 공간의 탐색능력이 우수하고 모형에 대한 유연성이 높아 제약식이나 목적함수의 변경이 용이하다는 장점이 있다. 그렇기 때문에 장기와 단기 유출모형의 특성에 유연하게 대처할 수 있다고 판단하여 본 연구의 최적화 기법으로 선정·적용하였다.

### 2.3 양상불 예측기법

양상불 예측은 강우-유출모형에 미리에 일어날 가능성이 있는 모든 강우 시나리오(즉, 강우 양상불)를 입력하여 그 결과물로 다수의 유량시나리오(즉, 유량 양상불)를 얻는 기법으로 양상불 예측에서 가장 핵심이 되는 사항은 생성된 유량 시나리오에 가중치를 부과하는 과정이며, 이를 통해 입력자료의 불확실성을 극복할 수 있는데 본 연구에서는 PDF-Ration 방법을 이용하여 유량 양상불에 가중치를 부여하였다.

### 2.4 PDF-Ratio 방법을 이용한 가중치 부여

기온, 강우, 유량 등  $n$ 개의 과거 수문기상 시나리오를  $X(= x_1, x_2, \dots, x_n)$ 라고 하고, 현재 유역의 상태, 지구 기상시스템 등과 같은 모든 수문학적 정보를  $H$ , 과거의 수문기상 시나리오의 분포를  $D(X)$ 라고 한다면  $X$ 의 수문학적 조건부확률은  $D(X|H)$ 로서 표현할 수 있다.

PDF-Ratio방법은 예측변수의 분포를 고려하여 예측변수에 대하여 연속인 가중치를 구하는 방법으로 하나의 기상 확률예보만으로도 가중치를 구할 수 있다. 기상변수  $X$ 에 대한 확률밀도함수를  $f_0(x)$ 라하고 수문학적 정보에 따른 조건부 확률밀도함수를  $f_1(x) = f(X|H)$ 라 하면 구하려는 가중치, 즉 시나리오  $x_i$ 에 대응하는 가중치  $\omega_i$ 는 식(3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\omega_i = (f_1(x_i)/f_0(x_i)) \tag{3}$$

## 3. 적용결과

### 3.1 모형의 검증

수정 TANK모형을 이용하여 유입량을 보다 정확하게 산정하기 위해 모형의 매개변수를 최적화하였으며 성주댐 유역의 1998~2002년 실측 강우를 수정 TANK모형을 이용하여 모의한 후 실측유입량과 비교하여 모형을 검증하였다.

성주댐의 연유입량은 전국적인 가뭄이 발생한 2001년을 제외하고 평균 114,720천 $m^3$ 을 나타내 60.3%의 유출률을 나타냈다. 상대오차의 경우 일별 평균은 25%, 월별, 년별 평균은 13%, 5%로 각각 나타났고, 결정계수는 1999년을 제외하고 모두 0.8보다 크게 나왔으며, 평균 0.83을 나타냈다. 모형의 효율성은 평균 0.78을 나타냈다(표 3). 상대오차, 결정계수 및 모형의 효율성 결과에 따라 본 프로그램이 성주지역의 유입량 산정에 적용이 가능하다고 판단하며 적용결과 홍수기에 다소 오차가 발생하였으나 장기유출의 경향이 비슷하게 나타났다(그림 4).

표 3. 성주댐으로의 실측유출량과 모의유출량의 비교

년도	1998	1999	2000	2001	2002	
강수량(mm)	1,281	1,377	1,087	878	1,341	
총 유출량( $10^3 m^3$ )	실측값	113,695	115,934	89,807	67,092	139,447
	모의값	115,608	112,661	92,086	74,083	121,849
상대오차	일별	0.21	0.26	0.31	0.26	0.22
	월별	0.11	0.13	0.20	0.13	0.12
	년별	0.05				
모형의 효율성	0.72	0.71	0.81	0.85	0.79	
$R^2$	0.81	0.74	0.88	0.89	0.85	

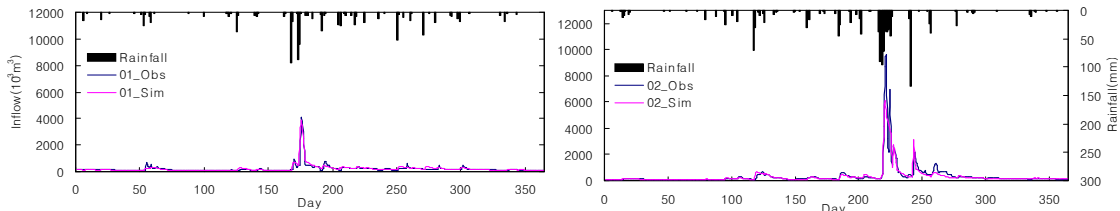


그림 4. 성주댐의 실측유출량과 모의유출량 비교(2001-2002)

### 3.2. 유입량 앙상블 생성

앙상블 예측의 효율성을 검증하기 위하여 탱크모형으로 1998~2002년까지 5년간의 예측유입량 앙상블을 생성하였다. 그림 5는 평수기 1월과 홍수기 8월의 유입량 앙상블을 도시한 결과이다. 예

측시점의 초기조건이 비슷한 경우에는 유입량 앙상블도 거의 비슷하였으나 그렇지 않은 경우는 각 예측월의 초기조건에 따라 서로 다른 유입량 앙상블이 생성되는 결과를 나타냈다.

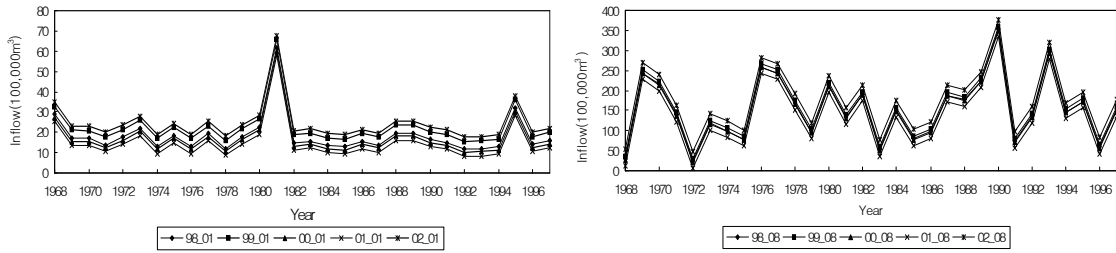


그림 5. 탱크모형으로 생성된 예측유입량 시나리오(1월, 8월)

### 3.3. PDF-Ration 적용결과

PDF-Ratio방법을 이용하기 위해서는 우선 과거 강우자료에 대한 분포의 검증을 실시해야 한다. 성주댐 월 강우자료의 경우 정규분포나 감마분포로 검증되는 월도 있었으나 일관성을 기하기 위하여 모든 월을 대수정규분포로 가정하여 가중치로 구하였다. 검증된 각 월의 과거 강우자료의 분포  $f_0(x)$ 와 강우 확률예보의 분포  $f_1(x)$ 도 대수정규분포로 동일하고, 다만 평균과 분산만이 변한다고 가정하면, 식(2)를 이용하여 강우량 시계열의 가중치  $w_i$ 를 구할 수 있다. 표 4는  $f_0$ 의 월별 평균( $\mu_0$ )과 표준편차( $\sigma_0$ )와 강우 확률예보에 따른  $f_1$ 의 평균( $\mu_1$ )과 표준편차( $\sigma_1$ )를 구한 결과이다.

표 4.  $f_0$  및  $f_1$ 의 월별 평균( $\mu_0, \mu_1$ )과 표준편차( $\sigma_0, \sigma_1$ )

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
$\mu_0$	20.0	22.9	393.2	70.2	72.2	135.4	211.2	159.6	151.8	41.7	29.3	21.6
$\sigma_0$	23.1	22.8	34.5	40.2	40.6	79.5	120.8	140.7	70.6	48.3	20.3	12.6

이상과 같이 PDF-Ratio방법으로 가중치를 적용하여 성주댐 5년(1998-2002년)동안의 유입량을 예측한 결과는 그림 6과 Table 5와 같다.

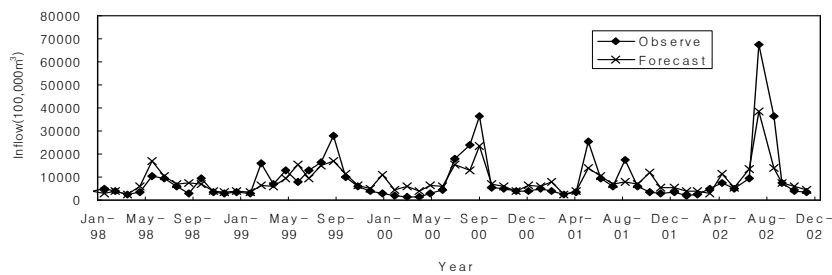


그림 6. 앙상블 기법을 이용한 성주댐 예측유입량(1998-2002)

표 5. 앙상블 기법을 이용한 성주댐 예측유입량(1998-2002)

월		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
월평균 ( $10^5 m^3$ )	Obs.	3,516	3,403	5,645	3,817	6,111	10,762	11,840	24,036	22,360	7,719	4,570	3,464
	Forecasted	5,960	4,143	5,631	3,580	7,504	11,552	11,873	15,835	13,648	7,902	6,516	4,749
1년	RMSE	10,338											
	RE(%)	45											
홍수기 제외	RMSE	1,883											
	RE(%)	33											

양상불 기법을 사용하여 성주댐 유입량 예측결과는 RMSE()와 RE()를 사용하여 비교하였고, 장기예측을 위한 연구 목적에 따라 홍수기(7월-9월)를 제외하고 비교하였다. 적용결과 홍수기를 포함할 경우 RMSE는  $10,338 \times 10^5 \text{m}^3$ , RE는 45%로 비교적 큰 오차를 나타내고 있다. 기상확률의 부정확성과 한국의 기상조건에 따라 홍수기의 집중적인 강우와 적용 년 중 2001년의 심한 가뭄의 영향이 크다고 판단된다. 홍수기(7월-9월)를 제외하고 비교한 RMSE는  $1,883 \times 10^5 \text{m}^3$ , RE는 33%로 현재 수자원 관리를 위한 장기예측으로는 적용이 가능하다고 판단된다. 오차가 다소 발생하고 있으나 장기 저수관리가 목적이므로 적용의 가능성이 있다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구의 목적은 홍수기에 집중적인 강우가 발생하는 한국의 기상조건에서 수자원의 효율적 관리를 위한 장기적인 물관리 기법을 연구하는데 있다. 따라서 양상불 예측기법 사용하여 유입량 양상불을 생성하고, 가중치를 부여하여 성주댐 5년(1998-2002) 동안의 장기 유입량 예측을 실시하였다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 유전자알고리즘을 이용하여 수정 TANK모형의 매개변수를 자동보정하고 이를 이용하여 장기유입량의 예측을 위해 1968년부터 1997년까지의 30개의 강우자료를 사용하여 예측년도(1998 ~ 2002)의 매월마다 30개의 유입량 양상불을 생성하였다. 그리고 PDF-Ratio방법을 이용하여 각 유입량 시나리오에 해당하는 가중치를 구한 후, 유량 확률예보의 정확성을 개선하였다.

2. 수정 TANK모형을 사용하기에 앞서 모형이 유입량을 정확히 모의 할 수 있는가에 대한 검증 실시하였다. 검증 작업을 위해 성주댐 유역의 1998 ~ 2002년 실측 강우를 사용하였고, 적용결과 홍수기에 다소 오차가 발생하였으나 장기유출의 경향이 비슷하게 나타났다. 상대오차의 경우 일별 평균은 25%, 월별, 년별 평균은 13%, 5%로 나타났고, 모형의 효율성은 평균 0.78을 나타냈다. 따라서 본 모형은 성주지역의 유입량 산정에 적용이 가능하다고 판단된다.

3. 양상불 기법을 사용하여 성주댐 유입량 적용결과 홍수기를 포함할 경우 RMSE는  $10,338 \times 10^5 \text{m}^3$ , RE는 45%로 비교적 큰 오차를 나타냈으나, 홍수기(7월-9월)를 제외한 경우 RMSE는  $1,883 \times 10^5 \text{m}^3$ , RE는 33%로 나타냈다.

적용결과 기상확률의 부정확성과 홍수기의 집중호우의 영향이 큰 것으로 나타나, 오차가 다소 발생하고 있으나 현재 성주댐의 저수관리를 위한 장기예측으로는 적용이 가능하다고 판단된다.

#### 참고문헌

1. Kim, Sun Joo, Jee, Yong Geun and Phil Shik Kim, 2004, Parameter Optimization of Long and Short Term Runoff Models Using Genetic Algorithm, Journal of the Korean society of agricultural engineers, Vol.46(5) pp. 41-52.
2. Kim, sun Joo, Kim, Phil shik and Chang Young Lim, 2004, behavior analysis of Irrigation Reservoir Using Open water Management Program, Journal of the Korean society of agricultural engineers, Vol.46(1) pp.3-13.
3. Faber, B. A. 2001. Real-time reservoir optimization using ensemble streamflow forecasts, Ph.D USA, Cornell University, Civil and Environmental Engineering.
4. Fread, D. L., 2001, "A Perspective on hydrologic Prediction Trends." Special Symposium on Hydrology, Phoenix, Arizona, USA: American Meteorological Society: J1-J6.
5. Faber, B. A. and J. R. Stedinger, 2001, Reservoir Optimization Using Sampling SDP with Ensemble Streamflow Prediction(ESP)Forecasts, Journal of Hydrology 249, No. 1-4:113-133.