

적설 및 용설 모의를 포함한 탱크모형의 소양강댐 및 충주댐에 대한 적용

A Tank Model Application to Soyanggang Dam and Chungju Dam with Snow Accumulation and Snow Melt

이 상 호* / 안 태 진** / 윤 병 만*** / 심 명 필****

Lee, Sang Ho / Ahn, Tae Jin / Yun, Byung Man / Shim, Myung Pil

Abstract

Snow accumulation and snow melt was simulated and included in the computation of the watershed runoff for Soyanggang Dam and Chungju Dam. A modified Tank Model was used for the simulation, which has three serial tanks and a pulse response function. The model parameters were estimated through the global optimization method of Shuffled Complex Evolution-University of Arizona (SCE-UA). A watershed was divided into four zones of elevation. The temperature decrease of the zones was a rate of $-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Almost all precipitation from December to February become accumulated as snow, and then the snow melts and runs off from March to April. The average runoff with snow melt was greater than the average runoff without snow melt during the period from March to April. The improved amount from snow melt simulation was about one fifth of the observed one for Soyanggang Dam. The increased amount for Chungju Dam was about one fourth of the observed average runoff during the same period. Although the watershed runoff was simulated including snow melt, it was less than the observed one for both of the dams.

Keywords : snow melt, Tank Model, watershed runoff, Soyanggang Dam, Chungju Dam

요 지

적설 및 용설모의를 포함하여 소양강댐과 충주댐에 대한 유출모의를 수행하였다. 사용한 모의모형은 탱크모형의 수정 형태로서 직렬 3단 탱크와 맥동 응답함수로 이루어져 있다. 매개변수의 추정에는 콤플렉스 혼합진화(SCE-UA) 전역최적화 기법을 사용하였다. 적설 및 용설모의를 위하여 유역을 고도별로 4개 영역으로 구분하였

* 부경대학교 건설공학부 부교수

Associate Professor., Division of Construction Engineering, Pukyong University, Busan 608-739, Korea
(E-mail : peterlee@pknu.ac.kr)

** 한경대학교 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Hankyong University, Korea

*** 명지대학교 토목환경공학과 교수

Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Myungji University, Korea.

**** 인하대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University, Korea

으며 고도에 따른 기온감률은 0.6°C/100m로 하였다. 모의 결과 12~2월 사이에 이 지역에 내리는 강수는 대부분 눈으로 쌓여 있다가 3~4월에 녹아서 유출되었다. 소양강댐의 3~4월 평균 유출량은, 융설모의를 하는 경우가 하지 않는 경우에 비하여 관측 유출량의 약 1/5이 증가되었다. 충주댐의 경우는 융설 모의로 인하여 관측 평균 유출량의 약 1/4에 이르는 유출량이 증가되었다. 그렇지만 두 댐 모두, 융설을 포함하여 유출을 모의하였음에도 불구하고, 모의 유출량이 관측 유출량보다 작았다.

핵심용어 : 융설, 탱크 모형, 유역 유출, 소양강댐, 충주댐

1. 서론

강설이 많은 지역은 추운 기간동안 눈이 쌓여 있다가 기온의 상승에 따라 눈이 녹아 유출된다. 이러한 지역의 유역유출 모의에는 적설 및 융설 모의가 필요하다. 우리나라에서 사용되어온 SSARR 모형은 적설 및 융설 모의 기능을 가지고 있다. 이 모형은 낙동강 수계에 여러 차례 적용되어 왔으나(한국수자원공사, 1996, 2001a) 적설심이 크지 않은 유역 특성상 적설 및 융설 모의가 부각되거나 분석되지 않았다. 오랜동안 사용되어온 탱크 모형도 적설 및 융설 모의를 추가하여 유출을 모의할 수 있다. 그렇지만 농업 수자원 측면의 유역 유출모의에서 적설 및 융설 모의는 무시되어 왔다. 즉 대부분의 연구나 실무 작업에서 융설의 영향이 분석되어 오지 않았다.

한강수계의 상류는 타 지역에 비하여 적설심이 큰 지역이 있다. 대관령의 1월 최심적설 기록은 1998년 1월 21일에 165.7cm 이고 태백 측후소에서는 동년 1월 16일에 94.5cm였다. 눈은 밀도편차가 커서 5~25%의 물과 같다. 보통의 경우 새로 온 눈은 약 10%의 비와 같

다. 그러므로 태백 측후소의 경우 약 94.5mm의 비에 해당하는 적설심이 기록된 것이다. 이러한 상황에 따라 소양강댐과 충주댐에서는 매년 3월부터 4월 중순까지 융설유출이 상당량 일어난다.

본 연구에서는 소양강댐과 충주댐에 대하여 적설 및 융설 모의를 포함한 유역유출 모의를 수행하였다. 사용한 모형은 탱크모형으로서 기존의 과업 수행결과(한국수자원공사, 2001b)로부터 작성된 3단 탱크의 수정형태이다.

2. 탱크모형의 국내 적용 사례와 사용된 탱크모형의 구조

탱크 모형의 구조는 Sugawara의 최초 개발 이래로 여러 가지 형태로 변화되어 사용되어 왔다. 그림 1(a)는 표준 4단 탱크의 형태이다. Sugawara 등(1984)은 표준 4단 탱크를 발전시켜 토양수분 저류구조를 가진 탱크모형(그림 1(b))을 개발하였다. 토양수분 저류구조를 갖는 4단 탱크 모형은 17개의 매개변수와 4개의 초기 상태변수를 가진다. 따라서 표준 4단 탱크보다 매개변

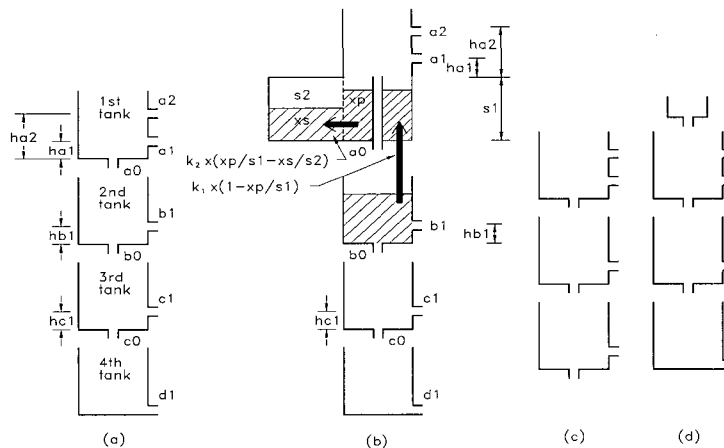


그림 1. 여러 가지 탱크모형 구조

수 추정이 어렵다. 우리나라에서는 토양수분 저류구조를 가진 탱크모형의 적용 사례는 없고, 표준 4단 탱크모형이 여러 차례 적용되었다(산업기지개발공사, 1985; 김현영과 박승우, 1986).

표준 4단 탱크도 12개의 매개변수와 4개의 초기 상태변수가 있다. 우리나라에서는 농업수자원 분야에서 탱크모형의 매개변수를 지역화(regionalization) 하려는 노력을 계속하여 왔다. 이를 위하여 먼저 4단 탱크모형이 적용되었으나(김현영과 박승우, 1986) 점차 3단 탱크모형을 지역화 하는 방향으로 연구되어 왔다. 보통의 경우 연속모의에 4단 탱크를 많이 사용함에도 불구하고 3단 탱크모형을 사용하는 이유는, 4단 탱크의 경우에 매개변수의 수가 많은 이유로 유역인자로부터 매개변수를 지역화하기 어려웠기 때문이다.

김현영과 박승우(1988)가 사용한 3단 탱크는 그림 1(c)이고 이 연구에서 매개변수를 지역화하는데 사용한 유역인자는 네 가지로서 유역면적, 논 면적비, 밭 면적비, 숲 면적비이다. 허유만(1992)도 동일한 형태의 탱크를 사용하였으며 매개변수 지역화에 하천연장과 형상계수를 추가하여 분석하였다. 두 연구에서 최하단 탱크에 침투공을 둔 것은 일반적인 탱크모형의 구조라고 볼 수 없고 불필요한 매개변수를 추정하는 오류를 가질 수도 있다. 그림 1(d)는 임상준(2000)의 연구로 최하단 탱크의 침투공이 없으며, 최상단 탱크에 차단저류를 나타내

는 탱크를 더 두고 있다.

가장 최근의 탱크모형 개발사례는 한국수자원공사(2001b)의 '맥동 응답함수(pulse response function)를 조합한 3단 탱크모형'이다. 맥동 응답함수는 마치 단위유량도의 중거값들과 같으며 NWSRFS의 유역 유출모형(Singh, 1995)이나 노재경(1991)의 연구에서 사용한 개념이다. 그림 2는 모형의 구조이다. 매개변수는 총 14개로서 유출공이나 침투공과 관련된 9개와 맥동응답함수의 중거 2개, 초기 저류고 3개로 구성된다. 맥동응답함수는 1단 탱크의 유출을 지체시키는데 사용된다.

직렬 3단 탱크를 사용하는 경우 발생하는 문제와 이를 개선한 결과(한국수자원공사 2001b)를 언급하면 다음과 같다. 유역면적 937 km²의 용담유역에 3단 탱크모형을 보정한 결과는 그림 3과 같다. 여기서 '70년 5월 10일 호우에 의하여 관측 유량수문 곡선은 5월 11일에 첨두유량을 기록하는 반면 계산유량은 5월 10일 당일에 첨두유량을 보인다. 연 단위 정도로 한꺼번에 유출 수문곡선을 나타내면 육안으로 확인할 수 없지만 며칠 간의 세밀한 그림에서는 분명히 문제를 알 수 있었다. 이러한 경향은 다른 시기의 호우도 마찬가지였으며 충주댐 유역에서도 마찬가지였다.

즉 유역면적이 큰 유역에서는 당일의 호우가 지체되어 유출되지만 단순 탱크모형으로는 이를 묘사하기 어렵다고 할 수 있다. 맥동응답함수를 도입하여 빠른 유출

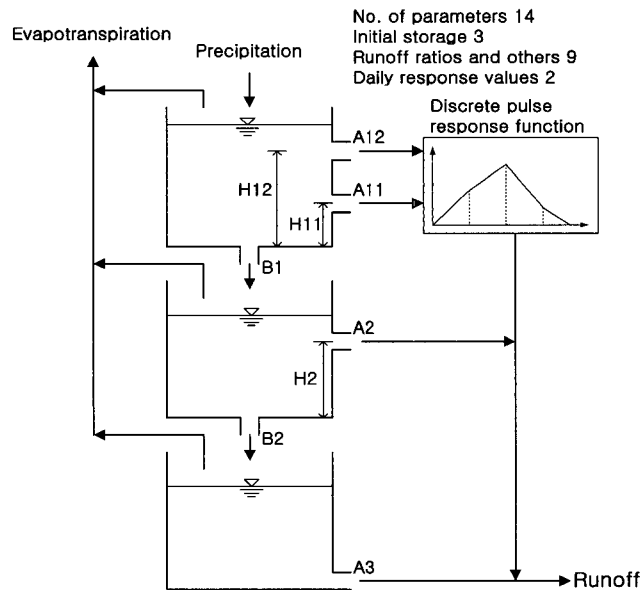


그림 2. 3단 탱크 및 이산 맥동 응답함수 조합의 모형구조

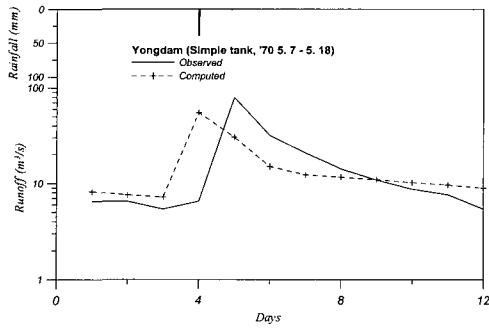


그림 3. 단순 3단 탱크모형의 응답 수문곡선

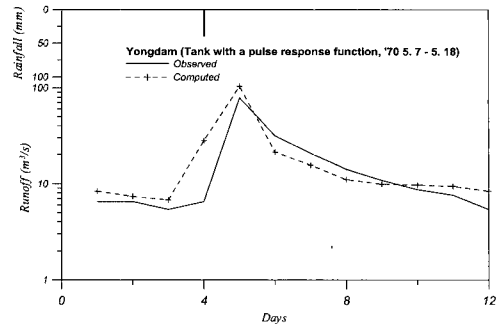


그림 4. 맥동 응답함수에 의한 1단 탱크 유출의 지체효과

을 지체시키면 완벽히 개선되지는 않더라도 첨두유출 시각의 불일치가 해소된다(그림 4).

본 연구에서는 증발계 증발량 자료만을 사용하여 잠재증발산량을 추정하였다. 허유만의 연구(1992)에서는 전국 15개 지점에 대한 증발계 증발량과 잠재증발산량의 관계를 선형 회귀식으로 작성한 결과가 있으므로 이를 그대로 적용하였다.

모형보정 과정은 보다 객관화시키기 위하여 최적화 기법에 의한 자동 보정 프로그램을 사용하였다. 여러 매개변수를 가진 수문모형의 경우에 목적함수를 지역적으로 최적화시키는 매개변수 군은 무수히 많다. 그러므로 지역최적화 기법을 사용할 경우에 보다 최적조건에

가까이 수렴한 해를 찾기 어렵다. 이러한 문제를 해소하기 위하여 전역최적화 기법을 모형보정에 사용하였다. 그 중에서도 SMA-NWSRFS(Soil Moisture Accounting-National Weather Service River Forecast System) 유출모의에 적용하여 우수성이 입증된 컴플렉스 혼합진화(Shuffled Complex Evolution; SCE) 기법(Duan, 1991)을 사용하였다.

3. 탱크모형의 적용

3.1 용설 모의를 위한 소오 입력 자료의 구성

유역의 평균 적설, 용설량은 유역내 관측소의 일 평균 기온을 바탕으로 추정될 수 있다. 그리고 유역 내 각

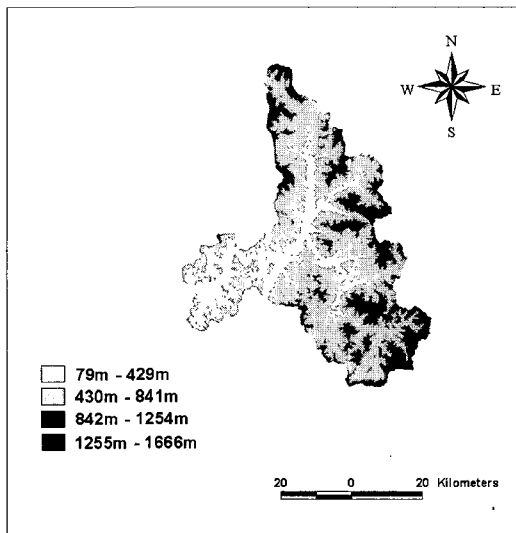


그림 5. 소양강댐 유역 고도별 분할

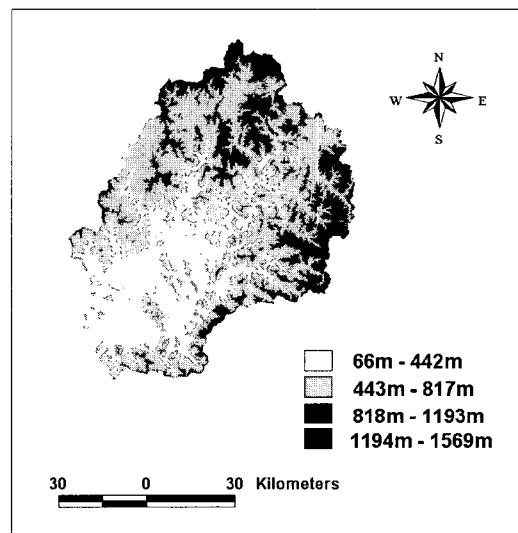


그림 6. 충주댐 유역 고도별 분할

표 1. 대상 유역의 고도별 분할

유역	분할 영역	고도 (m)	면적 (km ²)	면적비
소양강댐	1	79 ~ 429	564.1	0.21
	2	430 ~ 841	1524.7	0.56
	3	842 ~ 1254	584.4	0.22
	4	1255 ~ 1666	29.4	0.01
충주댐	1	66 ~ 442	2012.1	0.30
	2	443 ~ 817	3162.7	0.48
	3	818 ~ 1193	1394.1	0.21
	4	1194 ~ 1596	92.1	0.01

표 2. 분할 영역에 대한 온도저감 양

유역	기준 관측소	분할 영역	평균고도 (m)	온도저감 양(°C) 0.60°C/100m
소양강댐	인제 (고도 200m)	1	254	0.324
		2	635	2.61
		3	1048	5.09
		4	1460	7.56
충주댐	제천 (고도 220m)	1	254	0.204
		2	630	2.46
		3	1005	4.71
		4	1395	7.05

지점의 고도에 대한 온도변화를 고려하기 위하여 유역을 고도에 따라 적당히 분할하여야 한다. 유역을 분할하고 난 후에 각 분할영역은 온도와 강수가 일정한 것으로 가정한다.

본 연구에서는 소양강댐 유역의 기상관측소 중 인제 지점의 평균기온을 기상청으로부터 수집하여 입력자료를 구성하였다. 충주댐 유역의 기온 자료를 대표하는 기상관측소는 제천 지점으로 선정하였다.

소양강 댐 유역의 면적은 2,703 km²이고 충주댐의 유역면적은 6,661 km²이다(그림 5, 6). 이들에 대한 영역분할 면적은 표 1과 같고, 각 영역의 평균고도에 대한 온도저감 양은 표 2와 같다.

3.2 용설을 포함한 탱크모형 연속모의

탱크모형에서는 0°C를 기준으로 강수량을 눈과 비로 구분한다. 만일 눈인 경우 적설로 쌓이게 되며 비인 경우는 기존의 적설 중에서 일부가 녹아 비에 추가된다. 용설고는 다음의 식에 의하여 계산된다. 일본의 경우 SMELT 값을 4(mm/day/°C)로 사용한 사례가 있다

(Sugawara 등, 1984).

$$SMELT \times T(t) + (1/80)P(t) \times T(t) \quad (1)$$

여기서 SMELT 는 용설 매개변수 (mm/day/°C), P(t) 는 강수량 (mm), T(t) 는 온도(°C)이다.

위의 식에 의하여 용설고를 계산한 후 탱크모형에 의하여 유출을 모의하였다. 먼저 고도에 대한 온도저감률과 영역분할 개수의 적절한 값을 얻기 위하여 몇 가지 경우에 대한 모형보정을 수행하였다. 온도저감률은 100m 당 0.5°C, 0.6°C, 0.65°C를 사용하였고 영역분할 개수는 4개, 6개로 하였다. 0.65°C는 일반적인 습윤단열 감률이다. 소양강댐 유역에 대하여 1988~1994년의 7년 보정기간에 대한 평가 통계량은 표 3과 같다. 사용된 통계량은 네 가지로서 평균편차의 비율(PBIAS; percent bias), 오차비율 추정량(proportional error of estimate; PEE), Nash-Sutcliffe 통계량(Nash Sutcliffe efficiency; NSE), 유출 체적비(ratio of volume; ROV)이며 수식은 다음과 같다. PBIAS와

표 3. 분할영역 및 온도저감률에 따른 평가통계량 및 저류고

분할영역		4			6	
온도 저감률(°C)		0.5	0.6	0.65	0.6	0.65
SMELT 추정값		3.32	1.65	1.86	2.14	2.24
평가 통계량	PBIAS	35.21	33.89	33.87	34.21	34.08
	PEE	0.93	0.78	0.77	0.82	0.81
	NSE	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
	ROV	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96
저류고	초기값	611	650	650	595	629
	말기값	603	658	654	644	645

PEE는 零일수록, NSE와 ROV는 1에 가까울수록 좋다.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (q_i^{obs} - q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^N q_i^{obs}} \times 100 \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (q_i^{obs} - q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (q_i^{obs} - q_{mean}^{obs})^2} \quad (3)$$

$$PEE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{q_i^{obs} - q_i^{sim}}{q_i^{obs}} \right)^2} \quad (4)$$

$$ROV = \frac{\sum_{i=1}^N q_i^{sim}}{\sum_{i=1}^N q_i^{obs}} \quad (5)$$

여기서, N은 자료의 수, q_i^{obs} 는 관측유량, q_i^{sim} 은 모의 유량, q_{mean}^{obs} 은 관측유량의 평균값이다.

우선 기온 저감률이 0.5°C인 경우가 가장 나쁜 결과를 보인다. 저감률이 0.60 또는 0.65°C인 경우는 4 개로 영역을 분할한 경우가 보다 좋은 결과를 보인다. 기온 저감률이 0.65°C인 경우에 PBIAS와 PEE에서 미세하게 좋은 결과를 보이고 있으나 Sugawara 등 (1984)의 문헌에서 사용한 대로 0.60°C를 기온 저감률로 사용하였다. 일반적인 습윤단열 감률인 0.65°C를 사용해도 무방하리라고 생각된다.

소양강댐 유역에 대한 모형보정 및 모의결과는 그림 7이다. 보정기간은 1988~1994년의 7개년이다. 1995~1996년 기간은 모형보정으로 추정된 매개변수를 이용하여 모의한 결과이다. 모형보정에 의하여 추정된 매개변수는 표 4에 제시하였다. 이에 반하여, 용설모의를 수행하지 않는 탱크모형 보정 결과는 그림 6과 같다.

그림 8에서는 1990년 10월 1일부터 1991년 9월까지의 1개년 보정 결과만을 제시하고 있다. 시간축의 가운데 부분은 3월 하순부터 4월 사이를 가리킨다. 용설모의가 없는 경우 봄철의 유출은 과소하게 모의됨을 확연히 알 수 있다. 용설을 고려한 경우는 3~4월 기간의 유출이 매우 크게 개선됨을 알 수 있다(그림 9). 그림 8에서 3월 3일 ~ 4월 16일 사이의 모의 평균 유출량은 12.24 m^3/s 였고 관측 평균 유출량은 41.39 m^3/s 였다. 이에 반하여 적설 및 용설모의를 수행하는 경우는 모의평균 유출량이 30.79 m^3/s 로서 관측 평균 유출량과 26%의 차이만을 보인다. 1990년 10월부터 1991년 9월까지 1년 동안 모의 강설량은 93.1mm 였고 이중 84.0mm가 1991년 3월 3일 ~ 4월 16일 사이에 녹아 물의 형태로 탱크모형에 입력되었다.

충주댐 유역에 대하여 적설과 용설을 포함하여 모형을 보정하고 유출을 모의한 결과는 그림 10과 같다. 반면에 충주댐 유역에 대하여 용설을 고려하지 않고 모형을 보정한 결과 중 일부를 그림 11에 제시하였다. 1993년 봄철의 A 부분을 살펴보면 4월의 관측유량은 50~240 m^3/s 이었고 평균 112 m^3/s 였다. 이에 비하여 모의 유량은 평균 45 m^3/s 였다. 즉 용설을 고려하지 않을 경우 이 기간에 관측 유량은 모의 유량의 2.5배에 달하였다. 1994년의 1~2월 사이에는(B 부분) 관측유량이 약 20 m^3/s 이하였으나 모의 유량은 매우 커서 60 m^3/s 를 넘는 경우도 있었다. 즉, 이 기간에 내린 강수가 적설로 크게 기여하였음에도 적설-용설 모의를 수행하지 않을 경우 그림과 같이 그대로 유출되는 것을 알 수

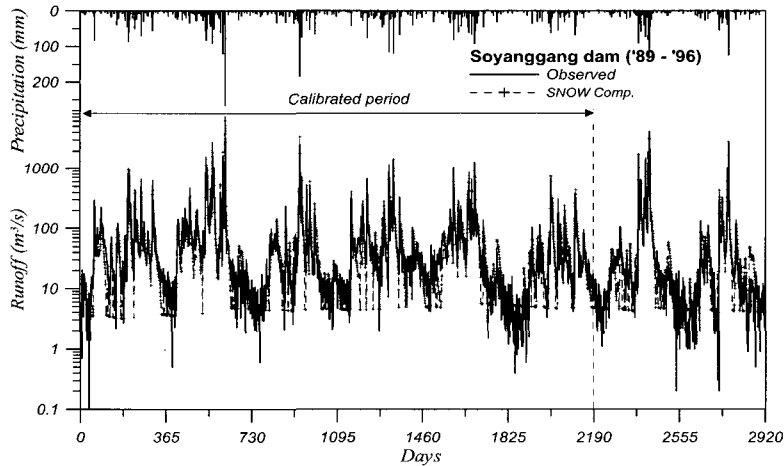


그림 7. 용설을 포함한 탱크모형 보정 및 모의 (소양강댐, 1989 - 1996년)

표 4. 추정된 탱크모형 매개변수

매개변수		소양강 댐	충주 댐
초기 저류고	S1I	0.00358	0.00665
	S2I	0.00911	0.00516
	S3I	650	1000
유출공 및 침투공 승수	A11	0.371	0.4549
	A12	0.520	0.4550
	A2	0.371	0.4549
	A3	0.000230	0.000270
	B1	0.1086	0.0900
	B2	0.1086	0.0900
	H11	53.7	68.2
	H12	117.9	125.2
맥동 응답함수 중거	H2	0.000342	2.15
	U1	0.694	0.1633
	U2	0.306	0.732
중발산 매개변수	U3	0.000	0.1050
	K_s	0.621	0.407
용설 매개변수	SMELT	1.655	1.180
비고	초기 저류고 합	650	1000
	최종 저류고 합	669	1000

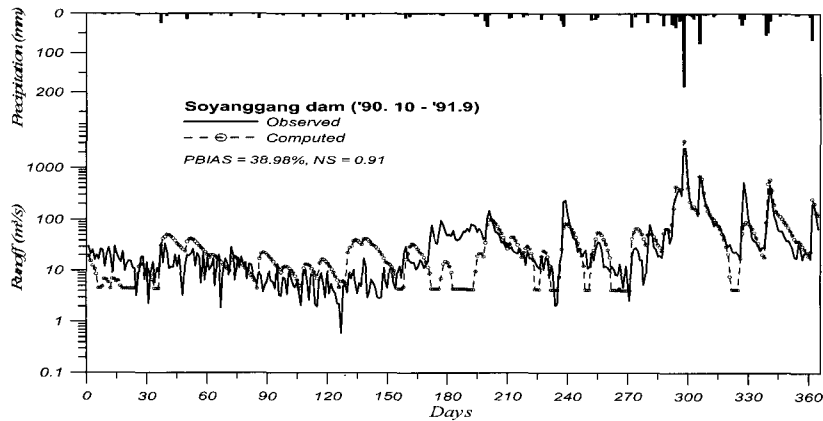


그림 8. 용설을 고려하지 않은 탱크모형 보정결과 (소양강댐, '90. 10-'91. 9)

있다. 그림 12는 용설을 고려한 탱크모형 보정결과 중
에서 그림 11과 동일한 기간의 수문곡선이다. 1993년
의 A 부분을 다시 보면 3월의 하순을 제외하면 3~4월
전체기간의 모의 유량이 관측유량에 근접하고 있으며 4
월의 모의 유량은 평균 $138 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다. 또한 1994년의
1~2월에는 강수가 있더라도 유출로 모의되지 않고 있

으며 그림 11의 B 부분에 유출되었던 강수가 그림 12
의 B' 부분으로 이동되어 유출된다. 즉 1~2월 기간의
강수가 적설로 쌓여 있다가 3~4월에 기온이 높아지면
서 용설로 유출됨을 알 수 있다.

표 5는 매해의 3~4월 기간동안 용설을 고려하지 않
은 평균 유출량과 고려한 평균 유출량, 관측 유출량, 용

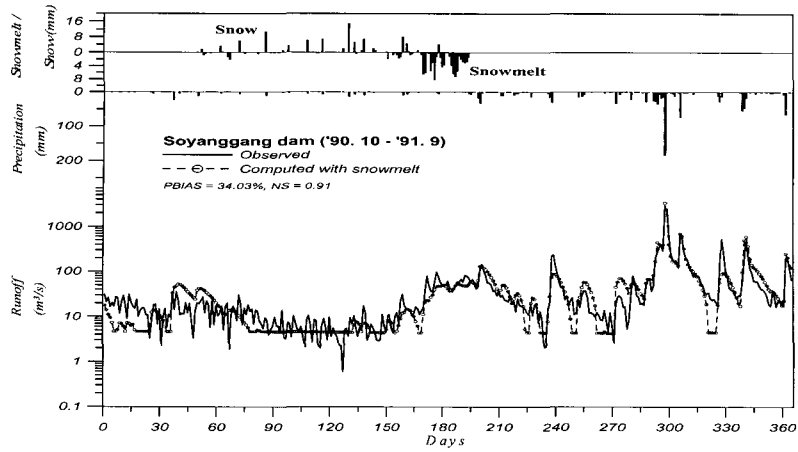


그림 9. 용설을 포함한 탱크모형의 보정결과 (소양강댐, '90. 10 - '91. 9)

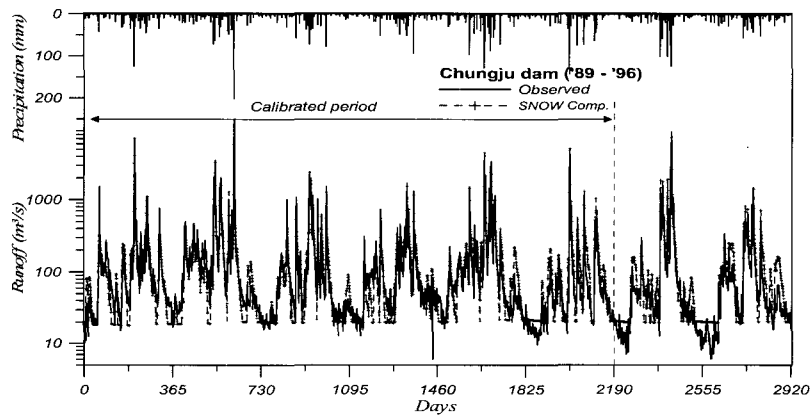


그림 10. 용설을 포함한 탱크모형 보정 및 모의 (충주댐, 1989 - 1996년)

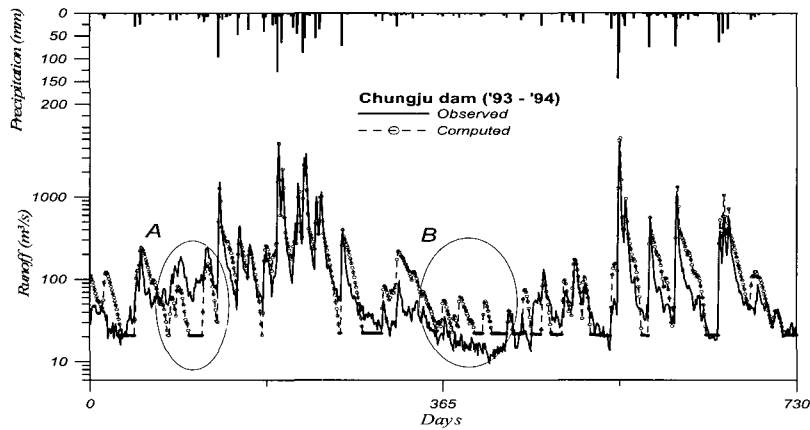


그림 11. 용설을 고려하지 않은 탱크모형 보정결과 (충주댐, '93 - '94)

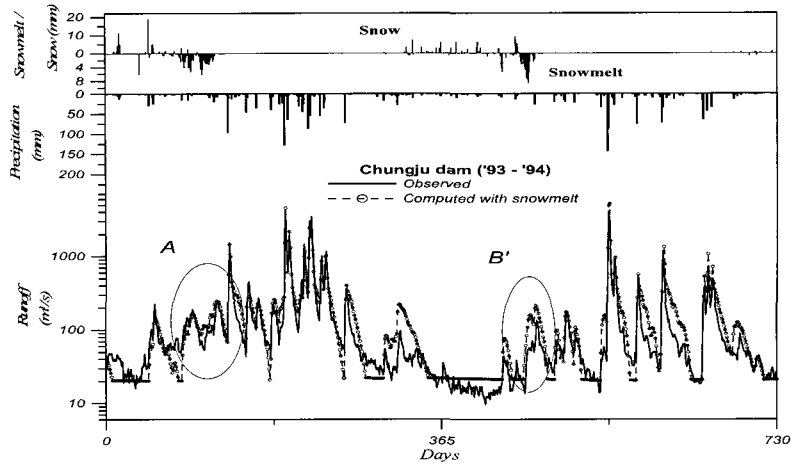


그림 12. 융설을 포함한 탱크모형의 보정결과 (충주댐, '93 - '94)

표 5. 3~4월의 모의 평균유량과 관측 평균유량 비교

연도		'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	평균
소양강댐	융설 미고려 (m^3/s)	41.2	46.1	23.7	31.1	18.6	14.1	21.4	25.2	27.7
	융설 고려함 (m^3/s) (융설고 (mm))	41.8 (106.0)	63.9 (56.7)	41.0 (84.3)	41.5 (38.6)	36.3 (90.5)	18.0 (44.8)	22.3 (40.1)	32.2 (51.7)	37.1 (64.1)
	관측 값 (m^3/s)	78.5	98.8	44.7	82.0	54.4	15.3	28.8	23.9	53.3
충주댐	융설 미고려 (m^3/s)	93.7	108.1	73.4	44.3	54.9	34.9	72.3	101.4	72.9
	융설 고려함 (m^3/s) (융설고 (mm))	114.6 (38.9)	149.0 (45.8)	98.6 (52.7)	60.8 (22.5)	93.6 (85.8)	67.4 (71.7)	89.0 (50.8)	136.3 (109.8)	101.2 (59.7)
	관측 값 (m^3/s)	158.8	184.5	135.3	107.2	92.1	38.4	64.4	85.3	108.2

표 6. 보정기간에 대한 평가통계량 및 유출고

유역		소양강댐		충주댐	
융설		고려	미고려	고려	미고려
평가 통계량	PBIAS	34.03	38.98	36.04	39.58
	PEE	3.50	4.47	0.76	0.97
	NS	0.91	0.91	0.86	0.85
	ROV	0.97	0.97	0.99	0.99
유출고 (mm)	계산	5342	5385	5264	5242
	관측	5525	5525	5322	5322

설고를 제시하고 있다. '89~'96년의 8년 동안 3~4월의 평균 유출량을 비교하면 다음과 같다. 소양강댐의 경우에 융설을 고려하지 않은 모의 유출량은 $27.7 m^3/s$ 로서 관측 유출량 $53.3 m^3/s$ 의 52%에 해당된다. 융설을 고려한 경우는 관측 유출량의 70%에 해당

된다. 즉 관측 평균유출량의 약 1/5이 융설에 의하여 모의된 것이다. 이 양은 3~4월 동안 융설이 없는 기간까지 포함하여 계산된 것이다. 그러므로 융설이 나타나는 기간만을 생각하면 융설 양이 관측 유출량에서 차지하는 비중이 보다 커진다. 표 5에서 소양강댐의 경우

'89년의 용설고가 106 mm임에도 불구하고 용설을 고려한 효과가 거의 없는 것처럼 보인다. 이것은 3월에 매우 많은 눈이 내렸기 때문이다. 눈이 3월에 쌓였다가 동일한 3월 중에 녹아 내렸기 때문에 용설 모의 효과가 드러나지 않아 보일 뿐이다. 충주댐의 경우는 용설을 고려하지 않은 모의 평균 유출량이 $72.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 로서 관측 평균 유출량 $108.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 67%이다. 반면에 용설을 고려한 모의 유량은 $101.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 로서 94%에 이른다. 즉 용설에 의한 평균 유출량이 관측 평균 유출량의 약 1/4을 이룬다. 충주댐 유역의 경우 용설을 고려하였을 때 3~4월에 대한 장기간 모의유량이 관측유량에 근접함을 알 수 있다. 그렇지만 각 해의 편차는 꽤 커서 평균제곱오차의 평방근(root mean square error)이 $36.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다. 소양강댐 유역의 경우는 대체로 용설을 고려한 유출량이 관측 유출량 보다 작았으며 이에 대한 평균제곱오차의 평방근은 $24.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다.

3~4월의 용설고는 소양강댐의 경우 평균 64.1 mm 이고 충주댐의 경우는 평균 59.7 mm 이다(표 5). 이 양 중에서 약 50~60%가 댐 지점의 유출로 기여한다. 우리나라의 평균 강수량 1,270 mm의 50~60%가 유출되는 점을 감안하면 위의 용설 유출량은 연평균 유출량의 약 5%에 이른다. 이것은 3~4월이 갈수기임을 감안할 때 의미 있는 양이다.

소양강댐 유역의 3~4월 유출이 적게 모의되는 이유는 여러 가지로 추측된다. 인북천의 상류는 북한지역으로서 강수량 관측이 이루어지지 않고 있으며 주변의 관측소도 상대적으로 적다. 이러한 관측소의 미비가 유출 모의에 영향을 줄 수 있다. 그리고 Sugawara 등(1984)에 의하면 강설지역에는 관측소가 어느 정도 있음에도 불구하고 관측되지 못한 강설량이 꽤 큰 경우가 있다고 한다. 이들 중 어느 요인이 용설모의에 오차를 유발하는지는 명확하지 않다.

용설을 고려하지 않은 경우 오히려 관측값에 가까운 결과도 있다. 소양강댐의 '94, '96년의 경우와 충주댐의 '94~'96년의 경우가 그러하다. 그 이유는 명확하지 않으나 4단 탱크 대신에 3단 탱크를 사용한 모형문제일 가능성이 있다. 3단 탱크로서 전체적인 경향을 모사하는 것은 가능하였으나 홍수 하강부나 갈수기의 완만한 변동을 모사하기 어려웠다.

표 6에는 별도로 보정기간 전체에 대한 평가 통계량을 제시하였다. 3~4월에 대한 비교만큼 두드러지는 않으나 용설을 고려한 경우 PBIAS와 PEE 통계량이

다소 개선되었다.

4. 결 론

소양강댐과 충주댐에 대하여 용설을 고려하여 3단 탱크모형으로 유출을 모의한 결과 3~4월 유출의 상당량이 용설에 의한 것임이 분석되었다. 소양강댐 유역의 경우, 3~4월 기간의 8년 평균을 비교할 때 용설유출을 고려한 경우가 고려하지 않는 경우보다 유출량을 크게 모의하며, 그 양은 관측유출량의 약 1/5 에 이른다. 그러나 용설을 고려하여 모의하였어도 모의 유출량이 관측유출량 보다 약 30% 적었다. 충주댐 유역의 경우는 용설유출 모의결과가 관측유출량보다 더 커지는 해도 있다. 그러나 3~4월 기간의 8년 평균을 비교할 때 용설을 고려한 유출이 고려하지 않은 경우보다 관측 유출량의 약 1/4 만큼 크다. 그렇지만 용설을 모의하였음에도 불구하고 모의 평균 유출량이 여전히 관측 평균 유출량 보다 6% 적다. 두 댐의 경우에 3~4월의 용설고는 연 평균 유출고의 약 5%에 이른다. 이것은 3~4월이 갈수기임을 감안할 때 의미 있는 양이다.

용설을 고려하였어도 관측유출량을 완벽히 모사하지 못하는 이유는 여러 가지가 있을 수 있다. 먼저 모의모형 자체의 문제일 수 있다. 또한 강수량 관측의 오차 때문일 수도 있다. 그리고 소양강댐 상류와 같이 관측시설이 미비하여 생기는 문제일 수도 있다. 이에 대해서는 본 연구에서 다루지 못하였으며 향후 연구할 필요가 있다.

적설 및 용설 모의는 다목적댐 운영에 관련된 기술을 제고할 수 있는 기초가 된다. 특히 12~4월의 갈수기 유출을 적절히 모의함으로써 단기 유출예측, 발전계획 수립 등에 활용 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-5-1)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- 김현영, 박승우 (1986). "유역특성에 따른 탱크모형 매개변수의 변화." **한국농공학회지**, 제28권, 제2호, pp. 42-52.
- 김현영, 박승우 (1988). "관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의발생(I)." **한국농공학회지**, 제30

- 권, 제1호, pp. 50-62.
- 노재경 (1991). 토양수분 저류에 의한 일 유출량 유역 모형. 박사학위논문, 서울대학교.
- 임상준 (2000). 농업유역의 논 관개회귀수량 추정 모형의 개발. 박사학위 논문, 서울대학교.
- 한국수자원공사 (1996). **낙동강 수계 실시간 최적 저수관리 시스템 개발.**
- 한국수자원공사 (2001a). **낙동강 수계 댐군 최적연계 운영 시스템 개선 연구보고서.**
- 한국수자원공사 (2001b). **수문자료 빈도분석 및 일 유출 모의 시스템 구축.**
- 허유만 (1992). 중소유역의 일별 용수수급해석을 위한 하천망 모형의 개발. 박사학위 논문, 서울대학교.
- Sugawara, M., Watanabe, I., Ozaki, E., and Katsuyama, Y. (1984). *Tank model with snow component*. Research Note of the National Research Centers for Disaster Prevention No. 65, National Research Center for Disaster Prevention, Japan.
- Duan, Q. (1991). *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic models*. Ph.D. dissertation, Univ. of Arizona, Arizona.
- Singh, V.P. (1995). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Colorado.
- (논문번호:03-02/접수:2003.01.13/심사완료:2003.09.19)