

탱크모형의 流出孔 乘數 變化를 고려한 홍수모의

Flood Simulation with the Variation of Runoff Coefficient in Tank Model

이 상 호*

Lee, Sang Ho

Abstract

Rainfall intensity under storms affects peak discharge or its time of occurrence in watershed runoff. Thus, it is reasonable to reflect the effect on the parameters of rainfall-runoff models or the governing equations of the models. This paper relates the change of the runoff coefficient of the first tank in tank model to rainfall intensity under storms. The standard four tanks have made the basic structure of the flood event model, and its modifications are as follows: it has two equal runoff coefficients in the first tank; the runoffs from first and second tanks produce delayed response through a simple delaying parameter. Applying the event simulation model to flood data from Naerinchon, runoff coefficients were estimated and their relation to rainfall intensity was analyzed. The results showed the weak relation of the two factors. The trend of the two was fitted with the equation $a1 = kI^m$, where $a1$ is the runoff coefficient of the first tank; I is rainfall intensity; k and m are fitting coefficients. In the verification, the model used moving averages for the calculation of $I(t)$. If the value $I(t)$ gave more greater value of $a1(t)$ than that of previous time($t-1$), the flood simulation was performed again from the beginning with the updated greater value of $a1$. The reflection of rainfall intensity on the runoff coefficient showed far better results than that of a fixed parameter.

Keywords: rainfall-runoff model, runoff coefficients of tank model, flood simulation

요 지

호우의 강우강도는 홍수 수문곡선의 첨두유량이나 도달시간에 영향을 미치는 주요 인자이므로 그 영향을 강우-유출 모형의 매개변수나 모형의 지배방정식에 반영하는 것이 합리적이다. 본 논문에서는 강우강도의 변화를 탱크모형 최상단 탱크의 유출공 승수 변화에 반영하는 방안을 연구하였다. 탱크의 구조는 표준 4단 탱크에서 최상단 유출공의 승수를 같도록 하고 1, 2단 탱크의 유출에 지체시간을 부여한 수정형태이다. 내린천 유역의 여러 홍수에 대하여 최상단 탱크의 유출공 승수와 강우강도의 관계를 분석한 결과 강우강도가 증가할 때 승수 $a1$ 도 증가하는 경향이 있으나 그 정도는 다소 약하였다. 이 경향을 $a1 = kI^m$ (I :강우강도, k, m :계수)의 근사식으로 작성하여 모형 검증에 사용하였다. 이 때 평균 강우강도 $I(t)$ 는 시각 t 에서 몇 시간 전까지의 이동평균을 사용하고, 계산된 $a1$ 이 그 전 값보다 크면 $a1$ 을 갱신하여 처음부터 시각 t 까지의 강우량으로 다시 유출을 모의하였다. 검증 결과 강우강도를 반영한 유출공 승수 $a1$ 의 적용이 고정된 값의 사용에 비하여 홍수모의 오차를 크게 축소할 수 있었다.

핵심용어 : 강우-유출 모형, 탱크모형의 유출공 승수, 홍수모의

* 부경대학교 토목공학과 전임강사

1. 연구 배경

홍수 사상에 대한 유출을 모의하는 방법은 여러 가지가 있다. 단위도는 간단한 방법으로서 널리 사용되고 있으며 저류형 집중 매개변수 모형으로 분류되는 저류함수법이나 탱크모형은 우리 나라에서도 많이 사용되고 있다. 그러나 위와 같은 방법으로 3~5일간의 홍수유출을 모의할 때 대표되는 매개변수들을 선정하기가 매우 어렵다. 하나의 홍수 사상으로부터 매개변수를 결정하여 다른 홍수에 적용하면 비슷한 강우 규모와 양상을 가지지 않는 이상 실제 유출 수문곡선을 제대로 모의하지 못한다. 저류형 집중 매개변수 강우-유출 모형이 가진 장애를 극복하는 대표적인 기법은 확장된(extended) Kalman 필터를 이용한 매개변수 갱신방법을 들 수 있다. Moore와 Weiss(1976)는 위의 추계학적 기법을 비선형 저수지 형태의 강우-유출 모형에 적용하였다. 정동국(1989)의 연구에서도 m 개의 균등 비선형 저수지로 구성된 모형의 매개변수를 확장된 Kalman 필터를 이용하여 순환추정(recursive estimation)하였다. Kalman 필터는 低水流出에도 적용되며, 이관수 등(1995)이 탱크모형 매개변수의 순환추정에 사용하였다. 최근에는 퍼지이론을 이용하여 저류함수법의 매개변수를 제어하는 방안도 도입되었다(이정규와 이창해, 1996). 추계학적 순환추정 기법의 가장 큰 특징은 새로운 관측 유량을 사용하여 매개변수를 갱신해 나가는 것이다. 따라서 정확한 강우-유출량 관측자료를 제공하는 것이 무엇보다도 중요하다. 그러나 정확한 하천유량 자료를 연속적으로 취득하는 것은 매우 어려운 일이며 우리 나라 하천수위 관측지점의 수위-유량 식들이 고수위 영역에서 부정확하다는 점은 계속 지적되어온 사실이다. 따라서 실시간 매개변수 갱신기법의 적용은 주로 연구 영역에 국한되고 있다.

본 연구에서는 위와 같이 갱신되는 유출 자료를 사용하여 매개변수를 변화시켜 나가는 대신, 매개변수와 물리적인 인자의 관계를 분석하여 물리적인 요소의 양적인 변동을 유출모의에 반영하는 방안을 강구하였다. 대상으로 한 강우-유출 모형은 탱크모형(Sugawara 등, 1984)이다. 이는 저류함수법과 함께 우리 나라에서 많이 이용되는 모형인데 저류함수법이 홍수 모의에 국한된 모형인 반면 탱크모형은 低水流出 모의에도 사용되는 모형이므로 활용성이 뛰어나다. 매개변수와 이에 영향을 주는 물리인자는 여러 가지가 있을 수 있지만 여기서는 탱크모형 최상단 탱크의 流出孔 乘數와 강우강도가 가지는 관계만을 대상으로 하였다.

2. 탱크모형의 유출공 특성

탱크모형에 의한 유출해석법은 하천유역을 몇 개의 저류형 모형용기 조합으로 표현한다(그림 1). 각 탱크의 우측 구멍은 유출을 표시하고 하부의 구멍은 침투를 표시한다. 최상단 탱크로부터의 유출은 지표면 유출성분을 의미하고 제2단 탱크로부터의 유출은 중간유출성분에 해당된다. 제3단과 제4단 탱크로부터의 유출은 기저유출을 표현한다. 탱크로부터의 유출 및 침투 과정은 그림 1 (b)와 같이 유출공과 침투공 하나씩을 가진 탱크에서 살펴볼 수 있다. 강우를 $r(t)$, 저류고를 $h(t)$, 유출공의 높이를 H_1 , 침투공과 유출공의 승수를 각각 λ_0, λ_1 이라고 정의하면 탱크의 유출량 $q(t)$ 와 침투량 $i(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$q(t) = (h(t) - H_1)\lambda_1 \quad (\text{단, } h(t) > H_1) \quad (1)$$

$$i(t) = h(t) \cdot \lambda_0 \quad (2)$$

연속방정식은 다음과 같다.

$$r(t) - q(t) - i(t) = \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

위의 식들로부터 $q(t)$ 를 구하면 다음과 같다(산업기지개발공사, 1985).

$r(t) = 0$ 일 때,

$$q(t) = C\lambda_1 e^{-(\lambda_0 + \lambda_1)t} - \frac{\lambda_0 \lambda_1 H_1}{\lambda_0 + \lambda_1} \quad (4)$$

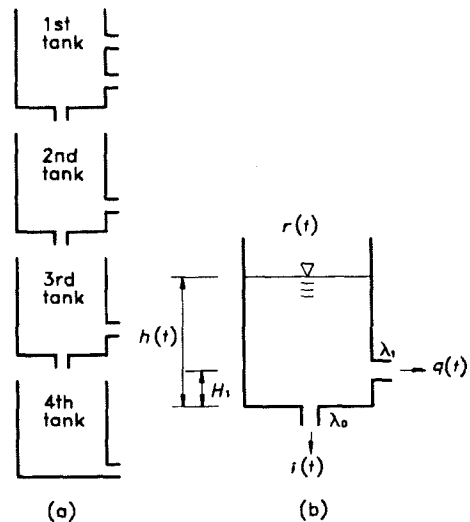


그림 1. 탱크모형 모식도

$r(t) \neq 0$ 일 때,

$$q(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_0 + \lambda_1} k(t) - \frac{\lambda_0 \lambda_1 H_1}{\lambda_0 + \lambda_1} \quad (5)$$

$$k(t) = \int_0^\infty r(t-\tau)(\lambda_0 + \lambda_1) e^{-(\lambda_0 + \lambda_1)\tau} d\tau \quad (6)$$

식 (4)는 유출량이 지수함수 형태로 저감되는 관계를 표시하고 식 (6)은 단위도법의 회선적분식과 유사한 형태이다. 침투량 $i(t)$ 도 유사한 식으로 표시되며 강우가 없으면 지수함수 형태로 저감된다. 다른 탱크의 유출 및 침투과정도 위와 유사한 형태로 진행된다. 실제 계산에서는 이산화된 수문자료로써 각 시간구간마다 식 (1), (2)로부터 유출량과 침투량을 구한다.

홍수유출과 관련하여 탱크모형의 주요 특성을 살펴보면 다음과 같다. 탱크모형은 강우의 이력에 따라 초기 손실량이 변화되는 현상을 나타낸다. 강우강도가 클 때는 최상단 탱크의 저류고가 증가하여 유출량 및 침투량이 함께 증가하고 강우강도가 작을 때는 침투하는 물의 양이 많아져서 서서히 유출되도록 한다. 모형은 측면 유출공의 개수를 여러 개로 하여 강우강도의 증가에 따라 유출이 가속적으로 증가하는 비선형 관계를 표현한다(그림 2). 탱크의 유출공 개수는 이론상 제한되지 않는다. 유출공의 수가 n 개 이면 저류고와 유출량의 관계는 그림 2와 유사하게 n 개의 꺾은선으로 표시된다.

강우강도가 커질 때 최상단 탱크로부터의 유출이 증가하는 것은 저류고 증가와 함께 여러 개의 유출공을 설치하여 표현할 수 있다. 그러나 3개의 유출공만 설치하더라도 최상단 탱크에 7개의 매개변수가 부여되므로 모형보정이 복잡해진다. 따라서 통상적인 탱크모형에서는 최상단 탱크에 2개의 유출공을 둔다. 모형의 단순화를 위하여 유출공의 개수를 적게 하는 것은 홍수유출 특성이 모형에 반영되는 것을 제한하는 요인이 된다. 실용적 측면에서 유출공의 개수를 제한하고 유출공 승수의 값을 고정시키는 것은 서로 다른 양상의 호우에 대한 유출모의에서 오차를 야기하는 주 요인이 될 수

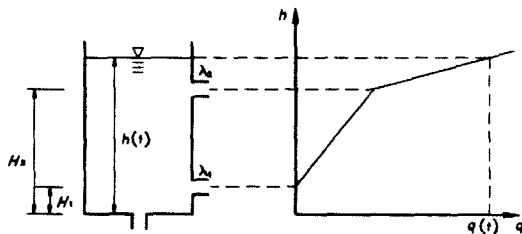


그림 2. 탱크의 저류고와 유출량의 관계

있다. 한편 호우의 강우강도가 침투 홍수량이나 침투 홍수량 도달시간 등의 홍수유출 특성과 밀접한 관련을 가지고 있음은 기존의 연구 결과로부터 알 수 있다. Minshall(1960)은 서로 다른 강우강도를 가진 홍수사상의 단위도들을 유도하고 강우강도가 큰 경우에 단위도의 침투 유출량도 커지는 결과를 제시하였다. 그리고 Overton과 Meadows(1976)도 불투수 평면의 지표면 유출을 운동파(kinematic wave) 흐름으로 해석하여 강우강도가 커질수록 출구의 수문곡선 상승이 급해짐을 보였다.

홍수의 강우-유출 양상은 강우강도에 크게 좌우된다. 그리고 탱크모형의 경우에 지표면 유출은 최상단 탱크로부터 모의되므로 최상단 탱크의 유출공 승수는 수문곡선 형상을 지배하는 주요 매개변수이다. 본 연구에서는 강우강도의 변화를 유출공 승수에 반영시켜서, 유출공 개수를 제한하고 유출공 승수값을 고정시켰을 때 발생하는 오차를 줄이고자 한다. 탱크모형의 유출 특성은 유출공 승수나 유출공 높이 등 여러 가지 매개변수에 의하여 지배된다. 그렇지만 여러 매개변수의 복합된 영향을 분석하는데 어려움이 따르므로 홍수 유출모의에서 중요하다고 생각되는 최상단 탱크의 유출공 승수만을 분석대상으로 하였다.

3. 홍수유출 모의

3.1 홍수자료 수집

홍수유출 모의 및 분석에는 내린천 수위관측소 유역의 자료를 이용하였다. 내린천은 소양호로 유입되는 주

표 1. 홍수자료 및 사용된 수위 유량식

홍수일시	수위-유량식
'75. 7.15. 01~7.18. 24	$Q = 21.05(h + 1.151)^{2.154}$ (한국수자원공사, 1990)
'81. 8.30. 12~9. 3. 24	
'84. 7. 3. 01~7. 6. 22	
'84. 8.31. 11~9. 3. 14	
'89. 7.24. 16~7.29. 05	Q : 유량 (m^3/s) h : 수위 (m; $H - 9.08$) H : 관측수위
'90. 6.17. 24~6.22. 24	
'90. 9.10. 10~9.13. 21	
'92. 8. 6. 20~8.29. 24	$H \leq 1.0$: $Q = 156.3(H - 0.2714)^3$
	$1.0 < H \leq 4.0$: $Q = -202.9 + 282.3H - 21.83H^2 + 2.891H^3$
	$H > 4.0$: $Q = 4.93(H - 0.2852)^{1.60}$ H : 관측 수위 (m) (한국수자원공사, 1993)

요 지류 중 하나이다. 상기 유역의 자료 중 '75년부터 '95년까지 침투 홍수량이 1,000 m³/s 보다 큰 주요 홍수자료를 수집하였고 총 유출량이 총 강우량보다 큰 자료는 배제하였다(표 1). 내린천 수위관측소의 수위-유량 관계식도 홍수 자료에 따라 표 1과 같이 적용하였다.

3.2 유역 평균강우량 계산

내린천 유역(그림 3)의 유역 평균 강우량은 Thiessen 계수를 구하여 계산하였다. 내린천의 유량 측정은 수위관측소 상류 약 4.5 km의 원대교에서 수행하고 있으므로, 유출모의에는 원대교 상류의 유역면적인 1,026 km²를 사용하였다. 내린천 유역의 강우량 관측소는 '87년 이후로 증설 운영되고 있으므로 Thiessen 계수(표 2)도 '86년 이전과 '87년 이후로 구분하여 산출하였다.

Thiessen 계수는 Monte Carlo 방법에 의한 가중치 산정법(강관원과 김주환, 1992)으로 계산하였다. 이를 위하여 먼저 유역경계를 도시하는 Auto CAD 파일로부터 경계를 이루는 꼭지점의 평면 직각좌표를 추출하고, 관측소의 직각좌표를 준비하였다. Monte Carlo 방법은 유역 경계와 우량 관측소를 포함한 일정 영역에서, 난수에 의하여 임의의 좌표점을 정한 후 가장 가까운 우량 관측소에 가중시키는 과정을 되풀이하여 가중된 좌표점 개수로서 Thiessen 계수를 구하는 방법이다.

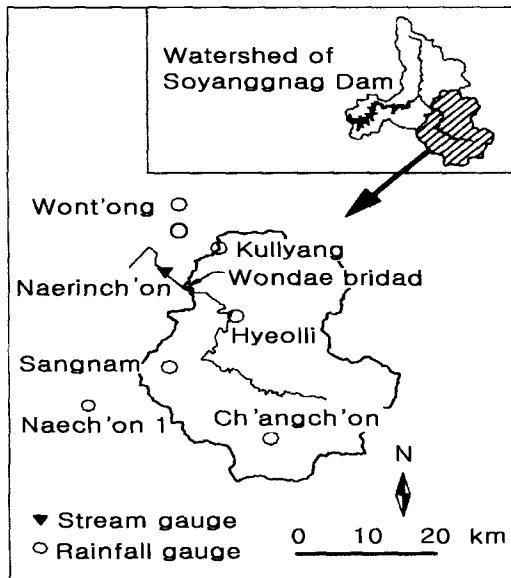


그림 3. 내린천 유역과 수문관측소

표 2. 유역 평균강우량 계산을 위한 Thiessen 계수

우량 관측소	Thiessen 계수	적용 홍수자료
현리	0.5111	'75. 7, '81. 8
창촌	0.4199	
내촌	0.0436	
원통	0.0254	'84. 9
창촌	0.4024	'89. 7, '90. 6
현리	0.3195	
상남	0.1520	
군량	0.1261	'90. 9, '92. 8

3.3 사용된 탱크모형의 구조

탱크에 의한 유출 구조는 표준 4단 탱크를 근본으로 하여 약간의 수정을 가한 형태이다(그림 4). 수정된 부분은 먼저 최상단 탱크의 유출공 승수 두 개를 동일하게 취한 점이다. 두 유출공 승수는 서로 다른 것이 정상적이다. 그러나 두 승수를 서로 다르게 하면 강우강도와 연관짓기가 어려워서, 두 값을 동일하게 취하여 분석을 단순화시켰다. 그리고 최상단 탱크와 2단 탱크의 유출은 시간단위로 지체시켜서 유역 출구의 유출이 되도록 하였다. 보통 최상단 탱크와 2단 탱크의 유출은 각각 지표면유출과 중간유출을 의미하여 홍수 수문곡선의 상승 및 하강부를 구성하는 주된 요소이다. 직접유출로 이해되는 두 성분이 유역출구의 유출량을 이루는데는 적당한 지체효과를 주어야 유출모의가 적절하였다. 河道流下의 효과를 또 다른 탱크로서 표현할 수도 있지만(산업기지개발공사, 1985), 매개변수를 3~4개나 추

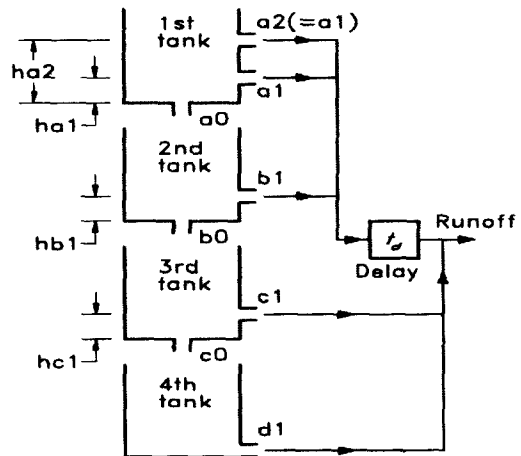


그림 4. 4단 탱크모형 구조도

가해야 하는 점과, 실제 추가했을 때 내린천 유역에서는 그다지 적절하지 못하였으므로 채택하지 않았다.

3.4 모형보정

사용된 모형의 매개변수는 총 16개로 이루어져 있다. 유출공 및 침투공의 승수 7개와 유출공의 높이 4개, 그리고 지체시간 t_d 는 그림 4에 제시된 바와 같으며, 이외에도 각 탱크의 초기 저류고 4개 (ha_0, hb_0, hc_0, hd_0)가 있다. 매개변수 추정 및 모형보정에는 Hill 알고리즘(Kuester와 Mize, 1973)이 사용되었다. 이것은 비선형 계획 기법의 일종으로 제어변수의 上下限을 제약조건으로 부여할 수 있다. 제약조건이 설정되는 알고리즘을 사용하는 이유는 매개변수 값이 음수가 되는 등 불합리한 값을 갖지 않도록 하기 위함이다. 후술되는 최상단 탱크 유출공 승수의 경향 분석에는 나머지 15개 매개변수를 고정된 채로 수행하였는데, 고정시킬 매개변수들을 추정하기 위하여 하나의 홍수 자료를 사용하였다. 오차제곱합을 최소로 하는 매개변수를 결정하기 위한 비선형 계획법의 구성은 다음과 같다.

$$\text{목적함수 } \text{Min} \sum_i (O_i - C_i(x_1, \dots, x_N))^2 \quad (7)$$

$$\text{제약조건 } G_k \leq x_k \leq H_k, k = 1, \dots, M$$

여기서 O_i 와 C_i 는 각각 관측유량과 계산유량이다. 그리고 x_1, \dots, x_N 은 제어변수로서 탱크모형의 매개변수를 의미하고 i 는 홍수자료의 시각을 나타내는 지표이다. G_k 는 제어변수의 하한값으로 0을 사용하였다. H_k 는 상한값으로 경험적인 값들로부터 선정하였다. 지체시간은 제어변수로 사용하지 않고, 1, ..., 5 시간 등으로 가정하여 각각에 대한 15개 매개변수를 추정한 다음 목적함수가 가장 작은 경우로 결정하였다. '92년 8월 홍수 자료로부터 매개변수를 추정된 값은 표 3과 같으며, 수문곡선은 그림 5에 제시하였다.

'92년 8월 홍수는 결측자료가 없으며, 수문곡선의 형

표 3. 매개변수 추정결과('92년 8월 홍수)

매개변수	추정값	매개변수	추정값
ra_0	0.07556	rhb_1	9.244
ra_1	0.06236	rc_0	0.002777
rha_0	0.004159	rc_1	0.01684
rha_1	30.11	rhc_0	11.88
rha_2	54.15	rhc_1	3.736
rb_0	0.03633	rd_1	0.003565
rb_1	0.07083	rd_0	31.37
rhb_0	0.2884	t_d	4

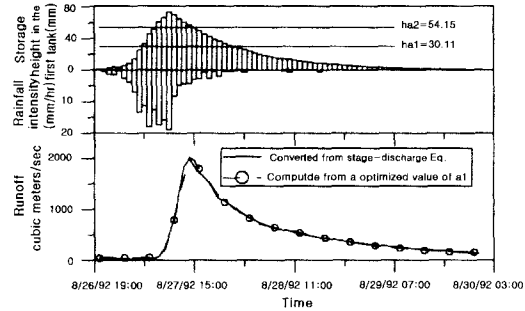


그림 5. 모형보정 수문곡선('92. 8월 홍수)

상에서 볼 수 있듯이 상승과 하강부가 하나로 단순하게 이루어져 있으므로 단일한 유형의 강우-유출 관계가 매개변수를 결정지을 것이라고 생각하여 선택하였다. 최상단 탱크의 저류고가 30.1(ha_1) mm를 넘으면, 하단 유출공으로부터 유출이 시작된다. 이 영향은 4시간 지체되어 나타나며, 이 때부터 유출 수문곡선은 급격한 상승을 시작한다.

3.5 매개변수의 민감도 분석

탱크에 관계된 15개의 매개변수에 대한 민감도를 분석하여 모형의 거동에 큰 영향을 미치는 변수들을 확인하였다. 그림 6, 7은 매개변수의 상대 변화량에 대한 침투유량과 오차제곱합의 상대민감도를 나타낸 것이다. 상대민감도의 계산은 다음과 같다.

$$R_s = \frac{\partial O/O_o}{\partial F_i/F_i} = \frac{\partial O}{\partial F_i} \frac{F_i}{O_o} = \frac{\Delta O}{\Delta F_i} \frac{F_i}{O_o} \quad (8)$$

여기서 O 는 침투유량 또는 오차제곱합이며 F_i 는 매개변수이다. 민감한 매개변수들은 최상단과 2단 탱크에 관련된 것들이다. hb_1 과 c_1 의 상대민감도 곡선사이에는 덜 민감한 매개변수의 상대민감도 곡선이 존재하지만 횡축 주위에 너무 조밀하게 모여 있으므로 편의상 생략하였다. 가장 민감한 매개변수는 a_1 (= a_2)이고, 최상단 탱크 상단 유출공의 높이인 ha_2 도 a_1 과 비슷한 민감도를 나타내었다. ha_2, ha_1, b_1, a_0 등의 영향도 무시할 수 없지만, a_1 의 적절한 선택은 유출모의 오차를 좌우하는 가장 중요한 것임을 알 수 있다.

4. 최상단 탱크 유출공 승수와 강우강도의 관련성 분석

4.1 홍수에 따른 최상단 탱크 유출공 승수의 추정

최상단 탱크의 유출공 승수 a_1 이 홍수 수문곡선 형

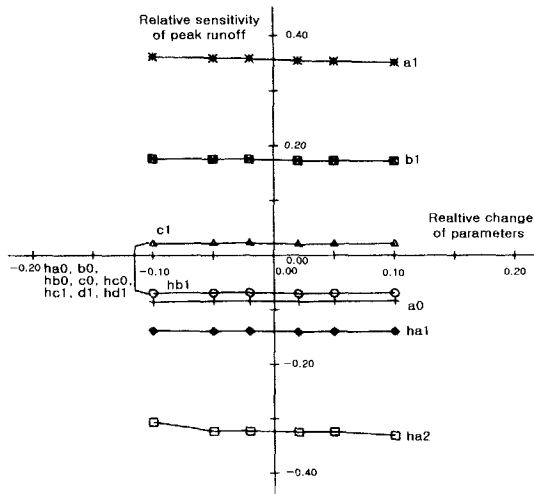


그림 6. 첨두 유량의 상대 민감도

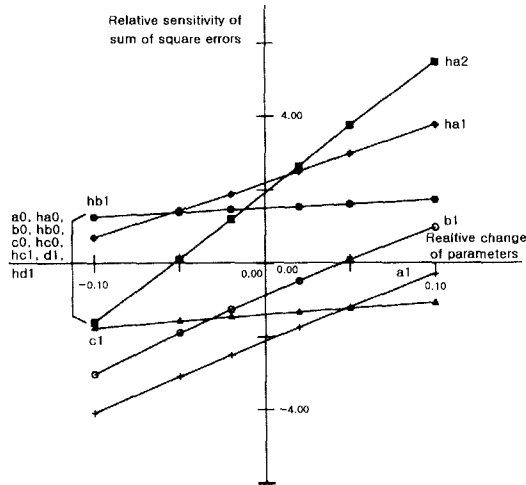


그림 7. 오차제곱합의 상대 민감도

성에 매우 큰 영향을 미치는 인자라는 점은 민감도 분석에서 확인한 바와 같다. 2절에서는 강우강도가 홍수 유출에 영향을 주는 주된 요소 중의 하나라는 점을 기존 문헌으로부터 고찰하였다. 이제 이들 두 요소의 관련성을 분석하기 위하여 각 홍수사상 마다 최상단 탱크의 유출공 승수를 다시 추정하였다.

탱크모형의 각 매개변수들은 서로 완전한 독립성을 가지지 않는다. 한 매개변수가 조금 조정되면 적절한 홍수 수문곡선을 재현하기 위하여 다른 매개변수들도 조금씩 변화시켜야 한다. 그러므로 모든 매개변수를 홍수마다 각각 추정하게 되면 강우강도가 유출공 승수에 미치는 영향을 단일하게 분석하기가 어려워진다. 그리

고 검증 단계에서도 어느 홍수에 대한 매개변수 군을 사용하는 것이 적절한지 판단하기도 어렵다. 그래서 a_1 과 초기 저류고 ha_0 , hb_0 , hc_0 , hd_0 을 제외한 나머지 매개변수들은 '92년 8월 홍수로부터 추정된 값으로 고정시키고, 초기 저류고는 후술되는 별도의 방법으로 계산하면서 각 홍수에 대하여 a_1 만을 추정하여 강우강도와 연관성을 분석하였다. 탱크의 초기 저류고는 그리 민감한 매개변수는 아니지만 홍수 초반의 유출을 지배하는 변수들이고 홍수마다 서로 다르다. 이들의 추정은 별도의 방식으로 추정하였다. 먼저 매개변수 a_1 만을 추정하는 작업을 임의의 4개 홍수사상에 대하여 수행한 후, 각각의 매개변수 군을 사용하여 강우량을 새로이 추가시키지 않은 상태로 유출량이 약 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 가 될 때까지 확장 모의하였다. 모의된 홍수 수문곡선에서 후반부의 유량 범위가 $5 \sim 150 \text{ m}^3/\text{s}$ 인 자료를 따로 분리하였다. 그리고 분리된 자료를 함께 모아서 유량과 각 탱크의 초기 저류고가 이루는 관계를 회귀식으로 작성하였다. 즉 모의 시점의 초기 유량을 알면 네 개 탱크의 초기 저류고가 결정되도록 하였다. 유역 출구의 초기 유량은 또 하나의 매개변수이다. 그런데 우리 나라의 경우에 강우가 시작되기 직전의 수위 결측은 비교적 드물고, 내린천 수위 관측소와 같이 하류의 댐으로부터 유출량의 범위를 짐작할 수 있는 점을 고려하면 초기 유량의 추정은 비교적 쉽다고 생각한다. 다만 低水 부분의 수위-유량 환산식이 다소 부정확한 점은 초기 유량 추정에 오차를 야기하는 불가피한 문제이다.

강우가 발생하기 이전의 초기 유출량은 주로 3, 4단 탱크의 저류고에 의하여 지배되었다. 몇 개의 홍수 자료로부터 작성된 초기 저류고 추정 수식을 다른 홍수에 사용하면, 유출 수문곡선의 시작부를 큰 오차 없이 모의할 수 있었다.

유출공 승수 a_1 의 추정에도 Hill 알고리즘을 사용하였다. a_1 을 추정한 7개 홍수 사상 중에서 두 가지 예만을 그림 8, 9에 표시하였다. 다른 매개변수를 고정시키고 a_1 만 추정하더라도 첨두 홍수량의 크기나 홍수 수문곡선의 모양은 대체로 잘 모의되었다. 그러나 그림 8과 같이 수문곡선의 상승시기가 다소 차이나는 경우도 있었다. 수문곡선의 상승시기는 주로 ha_1 을 이용하여 변동시킬 수 있다. 한편, '89년 7월 홍수사상으로부터 15개 매개변수를 동시에 추정하면 $ha_1=18.9\text{mm}$ 를 얻는다. 민감도 분석에서 본 바와 같이 ha_1 도 민감한 매개변수 중의 하나이므로, a_1 이외의 매개변수를 고정시키고서 홍수유출을 예측하는 경우에 ha_1 에 의한 오차

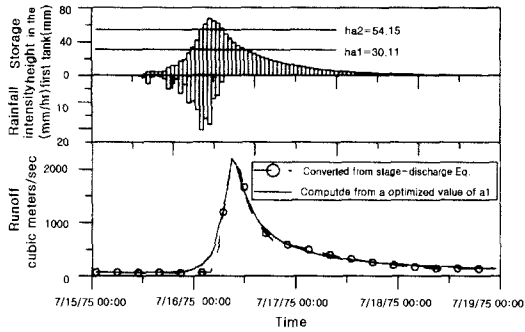


그림 8. 유출공 승수 a_1 의 추정 수문곡선 ('75. 7월 홍수)

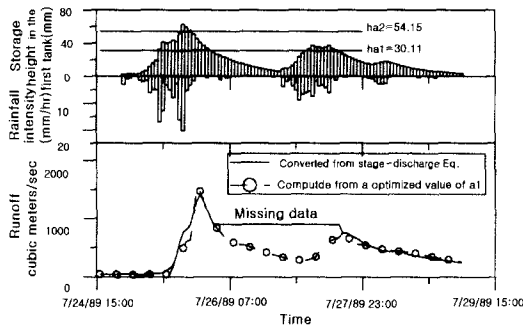


그림 9. 유출공 승수 a_1 의 추정 수문곡선 ('89. 7월 홍수)

를 평가할 필요가 있다. 추정된 유출공 승수 값 a_1 은 홍수 규모와 함께 표 4에 제시하였다.

유출공 승수와와 관련성을 분석할 강우강도는, 최상단 탱크 하부 유출공의 높이 ha_1 을 넘는 시점부터 침투유량 4 시간 이전까지의 평균 강도로서 정의하였다. 그림 5, 8, 9를 보면 홍수 수문곡선의 상승과 하강이

표 4. 유출공 승수(a_1) 및 홍수 특성

홍수 시기	a_1	평균강우강도 (mm/hr) (평균시간, hr)	최대 홍수량 (m ³ /s)	총 강우량 (mm)	유출률 (총유출량/총강우량)
'75/7	0.0814	15.6 (5)	2,190	114	0.961
'81/8	0.0489	5.13 (17)	1,020	201	0.843
'84/7	0.0594	7.25 (17)	1,520	212	0.736
'84/9	0.107	11.7 (30)	5,110 (계산)	514	0.865
'89/7	0.0648	10.1 (9)	1,410	205	0.797
'90/6	0.100	9.66 (7)	1,510	165	0.696
'92/8	0.0624	15.7 (6)	1,990	161	0.848

주로 최상단 탱크의 유출에 의해 지배되는 것을 알 수 있다. 다시 말해서, 최상단 탱크 유출공으로부터 출력이 지속된 기간 동안 내린 강우가 침투 홍수량이나 수문곡선 상승의 완급을 결정하는데 크게 기여한다. 그리고 침투 홍수량 발생 4시간 전까지의 강우가 유출 수문곡선 형성에 주로 기여하는 반면에, 그 이후의 강우는 급격히 감소함을 알 수 있다. 침투 홍수량 발생 4시간 이전까지의 강우강도를 평균 강우강도 계산에 사용한 것은, 최상단과 2단 탱크로부터의 유출을 4시간 지체시켜서 유역 출구의 유출로 계산하는 점을 감안한 것이다. 평균 강우강도의 계산에는 대부분 5~17시간 동안 지속된 강우가 사용되었고, '84년 9월 홍수의 경우에는 30시간 지속된 강우자료가 사용되었다.

강우강도와 유출공 승수 a_1 의 관계는 그림 10에 제시하였다. 대체로 강우강도가 커지면 a_1 값이 커지는 면을 볼 수 있으나, '92년 8월 같은 예외적인 경우도 있다(표 4). 연관성을 분석하는데 사용한 자료의 수가 적기 때문에 엄밀한 결론을 내리기는 어렵다. 그렇지만 강우강도와 a_1 이 연관성을 가지고 있으며, 그 정도는 약하다는 표현으로 분석 결과를 요약할 수 있다. 평균 강우강도에 따라 침투 홍수량도 증가하는 경향이 있다. 그러나 '84년 9월 홍수의 경우는 평균 강우강도에 비하여 최대 홍수량이 매우 크게 계산되었다(표 4). 평균 강우강도가 작게 계산된 점은 ha_1 을 넘는 시점부터 30시간의 긴 기간 동안 평균을 구하였고 이 동안에 10 mm/hr 이하의 시간 강우량 기록이 많았기 때문이다. 그리고 수위기록이 결측되어 실제 침투유량의 규모를

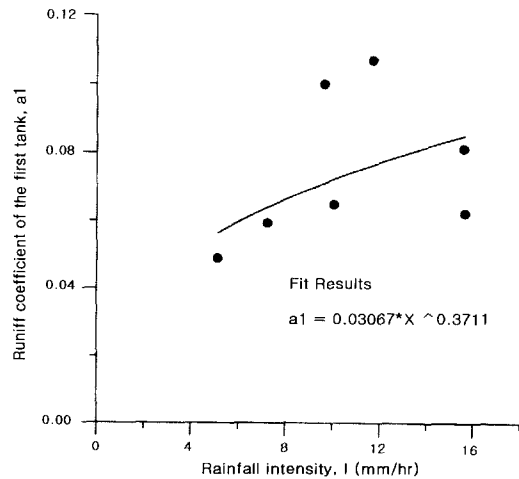


그림 10. 강우강도와 유출공 승수의 관련성 분석

알기 어렵지만 계산된 침투 유량이 5,110 m³/s로 매우 큰 것은 침투 시각 4시간 전에 50 mm/hr의 폭우가 집중된 결과이다. 주지의 사실이지만, 확인한 결과분석을 저해하는 요소로서 우리 나라 수문측정의 신뢰성이 한 요인을 차지한다. 내린천 유역의 홍수자료 중에서 총 유출량이 총 강우량보다 크기 때문에 사용하지 않은 자료가 5개나 되었던 것은 매우 아쉬운 일이었다. 그리고 4개의 강우량 관측값으로서 험준한 산악 지역인 내린천 유역의 면적 강우량을 계산하는 것으로부터도 오차가 발생될 수 있다. 또한 수위-유량 환산식의 작성에 1,500 m³/s 이상의 유량 측정 자료가 반영되지 못하고 있는 점도 매개변수 추정과 분석에 어려움을 준다.

4.2 유출공 승수 a_1 과 강우강도의 관계를 이용한 검증

홍수에 따른 유출공 승수 a_1 의 변동을 전부 표현할 수 없을지라도 그림 10의 관계를 근사할 수 있는 수식을 식 (9)와 같이 작성하였다.

$$a_1(t) = 0.03067 I(t)^{0.3710} \quad (9)$$

여기서 $I(t)$ 는 임의의 시각 t 에서 $t-4$ 까지의 5개 시간 강우량 자료에 대한 이동평균값으로서 매시각마다 새로운 강우량 관측값이 주어지면 a_1 을 다시 계산한다. 만일 $a_1(t)$ 가 $a_1(t-1)$ 보다 크면 $a_1(t)$ 를 유출공 승수로 갱신 저장하고 $t=0$ 부터 다시 유출량을 모의한다. 유출모의는 시각 t 까지만 관측된 강우량 값으로서 미래의 필요 시각까지 수행한다.

위의 수식을 이용하여 모형을 검증하였으며, 유출모의 절차를 자세히 적으면 다음과 같다.

- (1) 초기 유량으로부터 4단 탱크의 초기 저류고를 결정
- (2) a_1 을 제외한 나머지 11개 매개변수는 정해진 고정값 사용
- (3) 시각 $t(hr, t \geq 5)$ 에서 $t-4$ 까지 강우강도의 이동평균값 계산
- (4) 식 (9)에 의하여 $a_1(t)$ 계산
- (5) $a_1(t) > a_1(t-1)$ 이면 유출공 승수를 $a_1(t)$ 로 갱신
- (6) $1 \leq \tau \leq t$ 까지 관측된 강우량으로써, $\tau = 1$ 부터 미래시각까지 유출모의
- (7) $t \leftarrow t+1$ 로 변경하여 (3)~(6)의 과정 반복

$I(t)$ 의 계산에서 5시간의 이동평균을 사용한 것은, 표 4의 평균 강우강도 계산에서 평균시간의 최소값이 5시간이었던 점을 고려한 것이다. 그림 11에는 '90년 9월 홍수에 대한 모형 검증 결과를 제시하였다. 한편,

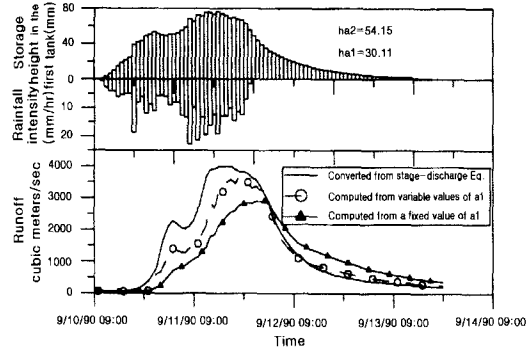


그림 11. 강우강도 변화를 유출공 승수 a_1 에 반영시킨 검증('90. 9월 홍수)

9월 10일 10시부터 9월 13일 21시까지 84시간 동안 환산 유량을 계산하여 총 강우량과 비교한 결과 총 유출은 내린 강우량의 104%였다. 그렇지만 '90년 홍수는 내린천 유역의 기록적인 홍수였으므로 그대로 검증대상으로 이용하였다. 환산된 침투 홍수량은 3,994 m³/s였고 계산된 값은 이보다 7.34% 작았다. 이때 평균 강우강도에 따라 변화되어 최종적으로 계산된 유출공 승수 a_1 은 0.0882였다. 결과를 살펴보면 수문곡선의 상승부에서 오차가 크게 발생하였으며 하강부는 오차가 축소되었다. 관측된 누계 강우량보다 환산된 유량의 합이 큰 것은 수위-유량식이 고수위 영역에서 과도한 유량을 지시하는 것을 반증한다. 따라서 침투 유출량의 차이는 보다 축소될 것으로 생각된다. 수위-유량식의 오차를 감안하더라도 유출공 승수를 변화시켜 모의한 수문곡선의 상승부는 환산유량과 큰 차이가 난다. 이것은 단지 강우강도 변화를 유출공 승수에 반영하는 것에 의해서만 홍수유출 양상을 전부 표현하기 어려운 한계를 의미한다. 그림 11에는 '92년 8월 홍수로부터 추정된 유출공 승수($a_1=0.0624$)를 고정시켜 모의한 결과도 제시하였다. 이 경우에 침투 유량은 2,898 m³/s로 크게 축소되었고 홍수 후반부의 오차도 크게 확대되었다.

'90년 6월 홍수 사상은 비록 근사식 (9)의 작성에 사용되었지만 그림 10에서 보는 바와 같이 근사식의 a_1 근사값과 약 0.03의 차이가 나므로, 승수 a_1 을 식 (9)에 따라 변화시켜 모의한 결과를 고찰하였다(그림 12). '90년 6월 홍수는 두 부분으로 나누어진 강우에 의하여 발생되었다. 두 호우 사이에는 17 시간의 無降雨 시기가 있어서 서로 독립된 홍수로 취급하는 것이 좋을 수도 있으나 나중 호우의 시작 직전에 2단 탱크의 저류고가 약 12 mm에 달한 점과 모형의 거동을 확인하는 의

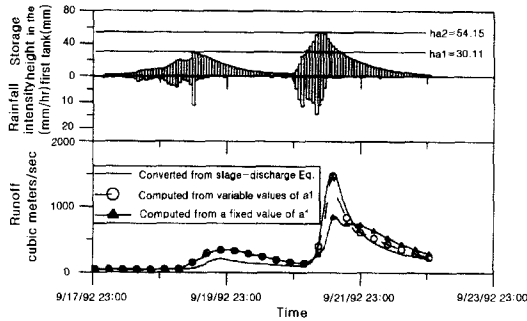


그림 12. 강우강도 변화를 유출공 승수 a_1 에 반영시킨 유출모의('90. 6월 홍수)

미에서 함께 모의하였다. 수문곡선의 초반 상승부는 약 100%에 이르는 오차가 발생하였으나 환산 유량의 최대 값이 $204 \text{ m}^3/\text{s}$ 로서 홍수라고 보기에는 어려웠다. 후반 상승부는 첨두 홍수량이 $1,506 \text{ m}^3/\text{s}$ 였다. 계산된 첨두 홍수량은 2.06% 작은 $1,476 \text{ m}^3/\text{s}$ 로서 큰 오차가 없었다. 계산된 총 유출량은 환산값의 112%로서 다소 컸다. 이 오차는 주로 초반의 상승 수문곡선에서 유발되었다. 후반 수문곡선의 상승시기는 일치하였으나 상승 및 하강부의 모의 수문곡선은 약 0~20% 작게 계산되었다. 갱신되어 최종 결정된 승수 a_1 은 0.0784였다. 만일 '92년 8월 홍수의 a_1 값인 0.0624를 사용하면 그림 12와 같이 첨두 홍수량이 42.6%나 축소되었고 수문곡선의 형상도 매우 크게 바뀌었다.

검증 결과에서 알 수 있듯이 하나의 홍수 사상으로부터 추정된 탱크모형의 매개변수를 다른 홍수 사상에 적용하면 매우 큰 오차가 발생할 수 있다. 이러한 오차는, 호우의 강우강도에 따라 유출공 승수 a_1 만을 조정하여도 상당히 축소시킬 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 강우강도의 변화를 탱크모형 최상단 탱크의 유출공 승수에 반영시킴으로써 홍수 유출량 모의의 오차를 축소시킬 수 있는 방안을 연구하였다. 탱크의 구조는, 표준 4단 탱크에서 최상단의 유출공 승수를 같도록 하고, 1, 2단 탱크의 유출에 4시간의 지체시간을 부여한 수정형태이다. 홍수 자료는 내린천 유역에 대한 것이다. '92년 8월의 홍수로부터 추정된 11개 매개변수를 고정하고, 초기 유출량에 의하여 탱크의 초기 유출고 네 가지를 추정하면서, 여러 홍수에 대한 유출공 승수 a_1 을 추정하였다. 추정된 a_1 과 강우강도의 관계를 분석한 결과, 강우강도가 증가할 때 승수 a_1 도 증

가하는 경향을 알 수 있는데 그 정도는 다소 약하였다. 이 경향을 $a_1 = kI^m$ 의 근사식으로 작성하여 모형 검증에 사용하였다. 강우강도 I 는 5시간 이동평균으로 계산하되, 새로운 강우량 자료가 주어지면 승수 a_1 을 계산하고, 큰 값이 계산되면 a_1 을 갱신하여 처음부터 다시 홍수 유출량을 모의하는 방식으로 검증 과정의 유출모의를 진행하였다. 명확한 결론을 내리기에는 몇 가지 제한 사항들이 있다. 즉, 분석에 이용한 홍수자료의 수가 적은 점과 수문측정 자료의 신뢰성이 다소 떨어지는 점, 그리고 다른 유역에 대하여 분석하지 못한 점이다. 그러나 검증과정에서 본 바와 같이 고정된 유출공 승수 a_1 을 사용하는 것보다 강우강도를 고려한 유출공 승수 a_1 을 사용하는 것이 오차를 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다. 몇 시간의 이동평균 강우강도를 취해야 적절한 지는 유역규모나 지역에 따라 달라질 것이다. 여러 유역의 다양한 홍수에 대하여 분석하여 유역 지형인자에 따른 이동평균 계산시간의 경향을 파악한다면 제안된 방법의 적용성과 한계가 보다 분명해질 것이다.

감사의 글

본 논문은 "시변성 매개변수를 사용한 가변응답 강우-유출 모형 연구"의 제목으로 수행한 부경대학교 기성회 연구과제의 연구결과 중 일부로서, 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다. 또한 자료의 정리와 연구진행에 도움을 준 강신욱 씨에게 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강관원, 김주환 (1992). "Monte Carlo 방법에 의한 유역의 지점별 Thiessen 가중치 산정." 인하대학교 산업과학기술연구소 논문집, 제20편, pp. 331-339.
- 산업기계개발공사 (1985). 탱크모형 방법에 의한 유출 해석법. p. 39.
- 이정규, 이창해 (1996). "저류함수법의 시변성 매개변수 조정에 퍼지이론 도입에 관한 연구." 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제29권, 제4호, pp. 149-160.
- 이관수, 이영석, 정일광 (1995). "탱크모형의 매개변수 추정을 위한 상태공간모형의 결정." 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제28권, 제2호, pp. 125-135.
- 정동국 (1989). "강우-유출 모형에 관한 상태 및 매개변수의 추계학적 추정." 박사학위논문, 서울대학교.
- 한국수자원공사 (1990). 소양강 다목적댐 관리연보.
- 한국수자원공사 (1993). 소양강 다목적댐 관리연보.

- Kuester, J.L., and Mize, J.H. (1973). *Optimization techniques with Fortran*. McGraw- Hill, New York, pp. 368-398.
- Minshall, N.E. (1960). "Predicting storm runoff on small experimental watersheds." *Journal of Hydraulics Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers*, ASCE, Vol. 86, HY8, pp. 17-38.
- Moore, R.J., and Weiss, G. (1980). "Real-time parameter estimation of a nonlinear catchment model using extended Kalman filters." *Real-time forecasting/control of water resources systems*, Pergamon Press, pp. 83-92.
- Overton, D.E., and Meadows, M.E. (1976). *Stormwater modeling*. Academic Press, New York, p. 68.
- Sugawara, M., Watanabe, I., Ozaki, E., and Katsuyama, Y. (1984). *Tank model with snow component*. Research notes of the National Research Center for Disaster Prevention No. 65, National Research Center for Disaster Prevention, Japan, p. 186.

〈최종본 접수일 : 1997년 12월 8일〉