강우와 유출의 혼합 모형에 의한 홍수 예보

이 재 형* 전 일 권** 김 운 중***

1. 서언

이 등(1992)에 의하여 지상에서 측정할 수 있는 기온, 기압, 이슬점 온도 등의 기상 변수를 입력으로하는 호우 모형이 개발된 바 있다. 본 연구에서는 이들 모형을 저류 함수형의 유출 모형과 결합하여 실시간 홍수 예보 가능성을 검트하고자 한다. 이를 위하여 2장에서는 호우 모형의 개요를 살펴보고 3장에서는 호우-유출 모형을 구성한다. 4장에서 적용 및 고찰을 통하여 5장에서 본 연구의 결과를 요약 정리한다.

2. 호우 모형의 개요

관측소 위 단위 면적당의 구름 기주를 고려하고 이 대상 체적에 수분 질량 보존 법칙을 적용하여 수분 저류량 X_o와 관측소에 낙하하는 강우량 R_p는 다음과 같이 나타낼 수 있다(이 등,1992).

$$\frac{dX_o}{dt} = f(u,a_I) - h(u,a_o)X_o \tag{1}$$

$$R_p = \phi(u,a_o)X_o \tag{2}$$

여기서 u는 기상학적 입력 변수인데 벡터이며 지상 기온(T_o), 지상 기압(P_o), 지상 이슬점 온도(T_d)이다. a_I와 a_o는 대상 체적에 流·出入 하는 수분 질량에 관계되는 매개 상수 벡터이다. $f(u,a_I)$는 대상 체적에 유입하는 수분 질량이고 $h(u,a_o)X$는 대상 체적을 빠져 나가는 수분 질량이다. 또한 R_p는 강우량이고 ϕ는 지표면 기상 변수에 종속인 비선형 함수이다.

---

* 정회원·전북대학교 공과대학 토목공학과 교수, ** 정회원·전북대학교 대학원 토목공학과, 박사과정 수료 *** 정회원·조선대학교 공과대학 토목공학과 부교수

3. 호우-유출 모형의 구성

홍수 수문 곡선의 예보을 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 2가지 방법으로 호우-유출 모형을 구성하여 비교 검토한다. 그 첫째는 2장의 호우 모형과 칼만 필터 기법을 토대로 호우 예보 모형을 구성하여 호우를 예보하고 이를 저류 함수 유출 모형의 입력 자료로 사용하여 홍수 수문 곡선을 예보하는 방법이고 그 둘째는 호우 모형과 프라사드 유출 모형을 결합하고 이것에 확장 칼만 필터 기법을 사용하여 홍수 수문 곡선을 예보하는 방법이다. 모형의 상태 방정식 (1)과 관측 방정식(2)를 칼만 필터 기법을 사용하여 예보 모형을 구성한다. 이 모형은 이 등(1994)에 상세하게 수록되어 있으므로 본 연구에서는 기술하지 않는다.

한편, 유출 모형으로 선택한 저류 함수법은 유역 또는 하도의 저류 함수식으로부터 수학적으로 유출을 산정 하는 방법이다. 이 방법의 기본은 하천 유역이나 하도에 대한 저류량과 유출량 관계를 나타내는 저류 함수를 연속 방정식과 조합하여 홍수 유출량을 산정 하는 것이다. 저류 함수법의 특성 파악이나 그 식의 유도 과정 등은 본 연구 범위 밖의 과제이므로 본 연구에서 저류 함수법의 기술은 생략한다.

홍수 수문 곡선을 예보하기 위한 두번째 방법으로는 강우 모형과 유출 모형을 결합하는것이다. 본 연구에서는 대상 유역을 집중 정수계로 하여 호우와 유출을 예보한다. 유출 모형으로는 부등류 효과가 반영되는 다음과 같은 프라사드 모형을 사용한다(Mays, 1978).

$$\frac{d^2Q}{dt^2} = -\frac{K_1}{K_2} NQ^{n-1} \frac{dQ}{dt} - \frac{1}{K_2} Q + \frac{\phi X}{K_2} \tag{3}$$

$s_1 = \frac{K_1}{K_2} N$, $s_2 = \frac{1}{K_2}$ 라하면 식(3)은 식(4)와 같다.

$$\frac{d^2Q}{dt^2} = -s_1 Q^{n-1} \frac{dQ}{dt} - s_2 Q + s_2 \phi X \tag{4}$$

또 $Q = X_1$, $\frac{dQ}{dt} = X_2$라하고 식(1)과 식(4)를 도함수 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{X}_o = f - hX_0 \tag{5}$$
$$\dot{X}_1 = X_2 \tag{6}$$
$$\dot{X}_2 = -s_1 X_1^{N-1} X_2 - s_2 X_1 + s_2 \phi X_o \tag{7}$$

식(5)- 식(7)을 행렬로 나타내면 식(8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_o \\ \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ s_2\phi & -s_2 & -s_1 X_1^{N-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_o \\ X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

칼만 필터 모형을 사용하여 유출 수문 곡선을 예보하기 위해 전술한 모형의 상태 방정식과 관측 방정식을 다음과 같이 구성한다(Gelb, 1974).

$$X(t+1) = F(X(t), U(t)) + W(t) \tag{9}$$
$$Z(t) = H(t)X(t) + V(t) \tag{10}$$

여기서, $X(t)$는 시간 t에서 상태 벡터이고, $U(t)$는 상태와 잡음(noise)에 관계없는 모형의 무작위 입력 벡터이다. $W(t)$는 평균이 0이고 공분산 매개변수(covariance parameter) $Q(t)$를 갖는 연속 시간 백색 잡음 과정(continuous time white noise process)이다. $V(t)$는 평균이 0이고 공분산 행렬 $R(t)$를 갖는 이산시간 백색잡음 계열이다. F(·)는 식(8)의 우측항을 나타내는 함수이다. $X(t)$는 상태 벡터이며 $H(t)$는 관측 변환 행렬이다. 필터 방정식은 반복적인 형태로 주어지며 공분산과 상태 추정을 위하여 초기 조건과 시스템 잡음 $W(t)$, $Q(t)$ 그리고 $R(t)$는 알고 있는 것으로 가정한다. Kalman과 Bucy(1961)에 의하여 개발된 선형 필터를 이용하기 위해서는 선형 모형 방정식이 필요하다. 모형의 일반적인 선형 표현을 가정하고, 필터 방정식은 이를 토대로 유도한다. 이것은 통상적인 선형화를 위하여 필요하고 선형화에 따른 계수와 상수가 주어져야 한다. 비선형 상태벡터 $X(t+1) = F(t)(X(t)) + W(t)$를 Taylor급수로 전개하면

$$X(t+1) = F(t)(\hat{X}(t)) + F'(t)(X(t) - \hat{X}(t) + W(t) \quad F(t)(\hat{X}(t)) = E(X(t+1)|Z(t)) = \hat{X}(t+1|t)$$

가 되는데 이를 칼만 필터에 적용하면 확장 칼만필터 알고리즘이된다. 이 기법을 요약하면 다음과 같다.

상태

$$X(t+1) = F(X(t), U(t)) + W(t), \quad W(t) \sim N[0, Q(t)] \tag{11}$$

관측

$$Z(t) = H(t)\,X(t) + V(t), \quad V(t) \sim N[0, R(t)] \tag{12}$$

진행

$$\hat{X}(t+1|t) = F(\hat{X}(t|t), U(t)) \tag{13}$$
$$P(t+1|t) = F'(t)\,P(t|t)\,F'^{T}(t) + Q(t) \tag{14}$$

갱신

$$\hat{X}(t+1|t+1) = \hat{X}(t+1|t) + K(t+1)[Z(t+1) - h(t+1)\hat{X}(t+1|t)] \tag{15}$$
$$P(t+1|t+1) = [I - K(t+1)\,H(t+1)]P(t+1|t) \tag{16}$$

필터 이득

$$K(t+1) = P(t+1|t)\,H^{T}(t+1)[H(t+1)\,P(t+1|t)\,H^{T}(t+1) + R(t+1)]^{-1} \tag{17}$$

정의

$$F'(t) = \frac{\partial F(X(t), U(t))}{\partial X(t)}\bigg|_{X(t) = \hat{X}(t|t)} \tag{18}$$

4. 적용 및 고찰

본 연구의 대상 유역으로 대청댐 유역을 선정하였다. 대청댐 유역 및 인근의 기상청 측후소는 대전 등 5개소이고 본 연구에서 소유역을 대표할 수 있는 미계측 지점으로 선정한 지점은 군북 등 9개소이다. 대청댐 유역에서 1983~1989년 동안에 발생한 호우 사상을 분석 대상 호우로 선정하였다. 호우의 선정 기준 및 방법은 1) 실무에서 홍수 유발 기준으로 삼고있는 유역 평균 강우량이 80mm를 초과하는 호우를 대상으로 매년 1개 이상을 선정한다, 2) 한해에 여러번 호우가 발생하였다 하더라도 독립으로 간주할 수 있는 호우 사상은 분석 대상에 포함시킨다, 3) 유입량을 검토하여 홍수 기록이 전혀 없는 사상은 삭제한다, 4) 호우가 발생하였더라도 수위 자료나 기상 자료가 결측 되었거나 자료의 신뢰가 의심되는 호우는 분석 대상에서 제외한다 등이다. 선정한 호우 사상을 호우 원인 별로 살펴보면 장마 전선이 5회 열대 저기압과 온대 저기압이 각각 2

표 4.1 선택 호우 사상(대청댐 유역)

번호	호 우 기 간	호우원인	번호	호 우 기 간	호우원인
1	'84. 9. 2 - 9. 4	장마전선	6	'87.8. 3 - 8. 7	온대저기압
2	'85. 7. 6 - 7. 12	장마전선	7	'87.8.20 - 8. 24	온대저기압
3	'85. 8. 14 - 8. 17	열대저기압	8	'87.8.28 - 9. 5	열대저기압
4	'85. 9. 15 - 9. 19	장마전선	9	'89.7.25 - 7. 29	장마전선
5	'87. 7. 21 - 7. 26	장마전선	10		

표 4.2 저류 상수 비율 벡터 추정치

호우번호		1	2	3	4	5	6	7	8	9	평균
발생일		84. 9. 2	85. 7. 6	85. 8.14	85. 9.15	87. 7.21	87. 8. 3	87. 8.20	87. 8.27	89. 7.25	
총강우량 (mm)		179.2	209.3	152.5	198.1	215.7	95.2	107.9	210.7	202.6	
유역	K	1.92	2.45	2.16	1.84	1.22	2.61	1.87	1.95	2.77	2.09
	P	0.54	0.30	0.72	0.59	0.84	0.28	0.60	0.49	0.57	0.55
	t_l	1.07	3.20	0.49	1.10	6.00	3.63	0.21	1.51	0.38	1.95
하도	t_l	1.54	0.97	1.46	1.83	1.83	0.99	2.35	1.41	1.30	1.52

회이며 이를 표 4.1에 수록하였다. 저류 함수 모형의 적용에 있어서 대청댐 유역은 21개의 유역과 13개의 하도로 구분 하였으며 이 유역과 하도의 저류 상수는 한국수자원공사(1992)에서 경험식에 의하여 산정한 값에 과거 호우 사상을 토대로 비율벡터를 산정하여 이의 평균값을 사용하였다(표 4.2). 한편, 미계측 지점의 호우 예보 결과를 표 4.3에 수록하였다. 표 4.4는 실측 및 예보 수문 곡선간의 관계를 분석하여 수록한 것이다. 표 4.4 OH는 실측 수문 곡선, PH는 예보 수문 곡선, ORMH는 실측 우량 자료와 표 4.2의 비율 벡터 평균값을 저류 함수 모형에 적용하여 산정한 수문 곡선이다. 또한 RMSE항의 RA는 OH와 PH간의 평균제곱근오차이고 RB는 실측 우량 자료와 표

5.11의 평균 비율 벡터를 저류 함수 모형에 적용하여 산정한 수문 곡선(ORMH)과 OH간의 평균제곱근오차이며 RC는 PH와 ORMH간의 평균제곱근오차이다. 이들 표에서 알 수 있듯이 실측 및 예보치 간의 RMSE는 강우량의 경우 0.3 ~ 1.1mm/hr이고 수문 곡선의 경우는 온대 저기압 337.4CMS, 열대 저기압 332.1CMS, 장마 전선 267.5CMS이다.

표 4.3 미계측 지점의 실측 및 예보 강우량

관측소 \ 호우 발생일	1987. 8. 3 총강우량(mm) 실측	1987. 8. 3 총강우량(mm) 예측	1987. 8. 3 RMSE (mm/hr)	1987. 8. 27 총강우량(mm) 실측	1987. 8. 27 총강우량(mm) 예측	1987. 8. 27 RMSE (mm/hr)	1989. 7. 25 총강우량(mm) 실측	1989. 7. 25 총강우량(mm) 예측	1989. 7. 25 RMSE (mm/hr)
군 북	69.0	85.7	0.4	233.0	243.2	0.6	134.0	147.1	0.4
보 은	95.0	109.6	0.7	209.0	214.1	1.1	185.0	192.1	0.6
이 원	67.0	80.9	0.5	223.0	239.6	1.0	307.0	309.2	1.0
황 간	71.0	76.8	1.1	171.0	181.0	1.0	188.0	191.5	0.9
금 산	119.0	124.9	0.4	161.0	174.2	0.6	193.0	202.7	0.4
영 동	87.0	103.1	0.9	273.0	279.2	0.9	202.0	211.6	0.6
진 안	136.0	142.0	0.5	194.0	213.1	0.6	197.0	194.8	0.4
무 주	120.0	126.2	0.5	217.0	232.9	0.6	186.0	188.2	0.5
장 수	104.0	108.8	0.4	204.0	210.3	0.4	243.0	246.1	0.3
평 균			0.60			0.75			0.58

표 4.4 실측 및 예보 유출량(호우를 예보하여 저류함수 모형 적용)

호우발생일	호우원인	총유출량(MCM) OH	총유출량(MCM) PH	총유출량(MCM) ORMH	RMSE(CMS) RA	RMSE(CMS) RB	RMSE(CMS) RC	총예측시간 (hr)
1987. 8. 3	온대저기압	314.3	274.5	250.3	337.4	339.4	175.3	84
1987. 8.27	열대저기압	834.9	808.2	786.5	332.1	346.7	216.8	144
1989. 7.25	장마전선	597.5	515.0	503.0	267.5	382.9	164.6	96

한편, 호우-유출 모형을 결합한 경우, 프라사드 유출 모형의 계수 K_1, K_2, N은 과거 호우 사상 자료를 토대로 각각의 호우 사상에 대하여 최적 값을 추정하고 이의 평균 값을 사용하였다. 계수의 추정은 Hooke(1976) 등이 제안한 직접 탐색 알고리즘을 사용하였다. 각 호우 사상에 대하여 추정한 계수를 표 4.5에 수록하였다. 표 4.5의 평균 값을 4장에서 구성한 호우-유출 모형에 사용하여 예보한 유출 수문 곡선과 실측 수문 곡선간의 관계를 분석하여 표 4.6에 수록하였다.

표 4.5 프라사드 모형의 계수 추정치

호우 발생일	K_1	K_2	N	호우 발생일	K_1	K_2	N
84. 9. 2	26.8400	154.6500	1.2970	87. 8. 20	24.3473	209.7445	0.6041
85. 7. 6	181.0325	203.9100	1.9477	87. 8. 03	9.0343	137.8512	0.6092
85. 8. 14	8.4859	166.2197	0.9357	87. 8. 28	1.5447	91.9217	0.6488
85. 9. 15	7.8063	138.1125	0.8607	89. 7. 25	14.8265	105.0143	0.6105
87. 7. 21	3.7155	108.1709	0.7660	평 균	9.9658	136.7047	0.7194

표 4.6 실측 및 예보 유출량(호우-유출 모형의 결합)

호우발생일	호우원인	총강우량 (mm)			총유출량(MCM)			총예측시간(hr)
		실측	예측	RMSE (mm/hr)	실측	예측	RMSE(CMS)	
1987. 8. 3	온대저기압	95.2	74.0	2.51	314.4	296.0	555.6	84
1987. 8.27	열대저기압	210.7	180.4	2.27	834.9	806.1	743.1	144
1989. 7.25	장마전선	202.6	163.5	1.82	597.5	565.5	501.3	96

5. 결언

물리 모형을 토대로한 호우 모형과 유출 모형을 결합한 호우-유출 모형을 대청댐 유역에 적용하여 홍수 수문 곡선 예보에의 적용성을 살펴보았다. 이때 모형에 포함된 계수들은 과거 호우 사상으로 부터 최적값을 구하고 이의 평균 값을 사용하였다. 본 연구 모형의 적용성을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다. 미계측 지점의 호우를 예보하고 저류 함수 모형을 사용하여 홍수 수문곡선을 예보한 경우의 실측 및 예보치 간의 평균제곱근오차의 범위는267-337CMS이고 집중 정수계로 하여 호우-유출 모형을 결합하여 예보한 홍수 수문 곡선의 실측 및 예보치간의 평균제곱근오차의 범위는 501.3-743.1CMS이다. 한편 전자 모형의 경우 미계측 지점에 대한 강우의 실측 및 예보치간의 평균제곱근오차의 범위는 0.58-0.75mm/hr이며 후자 모형의 경우에 있어서 그 범위는 1.82-2.51mm/hr이다. 이상의 결과로 볼때 이 두 모형중 미계측 지점의 강우를 예보하고 저류 함수 모형을 사용하여 홍수 수문 곡선을 예보한 경우가 실측 홍수 수문 곡선에 근접한다. 또한 유역 출구의 유출량을 호우-유출 예보 모형에 적용하여 실측 홍수 수문 곡선에 보다 근접한 호우-유출 모형을 구성하기 위해서는 유역 강우 분포를 반영할 수 있는 호우-유출 모형의 구성이 필요한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 이재형, 선우중호, 전일권, 정재성, "구름 물리학을 토대로한 지점 호우 모형 개발", 한국수문학회지, 제 25권, 제 4호, 1992, pp.51-59.
2. Creutin J.D. and Ch. Obled, "Modeling Spatial and Temporal Characteristics of Rainfall as Input to a Flood Forecasting Model", In Hydrological Forcasting, 1980.
3. 이재형, 전일권, " 기상 자료 미계측 지점의 강우 예보 모형", 대한토목학회논문집, 제 14권, 제 2호 ,1994, pp.307-316
4. 이재형, 심명필, 전일권, "대청댐 예비 방류를 위한 홍수예보", 한국수문학회지, 제 26권, 제 2호, 1993, pp.99-105.
5. Gelb,A.(Ed.), "Applied Optimal Estimation", The M.I.T. Press, Cambridge, Mass. 1974.