강우-유출 예측모형에 퍼지기법의 적용

이 정 규*, ○김 한 섭**

1. 서 론

홍수를 일으키는 강우-유출현상은 많은 물리적 현상들이 대단히 복잡하게 얽혀있고, 수많은 지형적요소와 수문학적변수가 관련되어 있기 때문에 각각의 수문현상이 가지는 비선형성, 변동성, 시변성, 동역학적 특성들을 모두 포함하는 유출모형을 수립하는 것은 거의 불가능하다(Singh, 1988). 그렇기 때문에 기존 대부분의 강우-유출모형은 중요한 몇 개의 변수만을 포함한 단순화된 형태를 가지고 있다.

현재 국내하천의 홍수 예경보시스템의 운영과 다목적댐의 홍수조절 관리에는 수문학적 모형인 저류함수모형(storage function model)이 사용되고 있다(한강홍수통제소, 1994, 낙동강홍수통제소, 1991). 저류함수모형은 유역이나 하도에서 유출량과 저류량의 관계를 표시하는 저류함수를 홍수류의 연속방정식과 조합하여 유출량을 산정하는 홍수유출계산모형이다(木村, 1958, 1961, 1962). 저류함수모형을 이용함에 있어 가장 중요하고도 어려운 문제점은 각각의 적용유역과 호우사상에 따른 적절한 매개변수를 결정하는 것이다. 현재까지는 매개변수를 결정하기 위하여 경험적인 방법을 사용하여 왔으며, 오차 발생 시 수문기술자의 경험적 판단에 의한 매개변수 보정에 의존하므로써 유역내 수문현상의 변화에 따른 매개변수 변동특성을 적절히 반영하지 못해 홍수량 예측의 정확성에 문제가 있었다.

따라서 본 연구에서는 저류함수모형에 매개변수 최적화 기법 및 시변성매개변수(time variant parameter) 제어를 위한 퍼지기법을 도입하여 위에 제기된 수문학적 방법의 문제점을 개선하고자 한다. 홍수유출모형은 저류함수법을 기초로 하여 유역유출모형과 하도유출모형으로 각각 구성하였다. 적용유역의 최적매개변수는 기존 호우사상을 이용하여 최적화기법으로 구하였으며, 이를 적용유역의 대표값으로 채택하여 주요매개변수를 시변성으로 취급하는 퍼지기법을 도입하였다. 수립된 모형으로 홍수유출해석을 수행한 후 그 결과를 기존 모형 등과 비교하여 본 모형의 타당성 및 퍼지기법의 적용성을 검토하였다.

2. 저류함수모형

유역저류함수모형는 다음과 같은 지배방정식으로 구성된다.

$$S_l = KO_l^P \qquad (1)$$

$$\frac{1}{3.6} f r_{ave} A - O_l = \frac{dS_l}{dt} \qquad (2)$$

여기서, K와 P는 유역저류함수의 매개변수이고, f는 유입계수이며, r_{ave}는 시간당 유역평균강우량(mm/hr), A는 유역면적(km^2), $O_l(t) = O(t+T_l)$로서 유역의 지체시간 T_l을 고려한 유역으로부터의 직접유출량(m^3), S_l은 유역저류량(m^3)이다. 그러나 실제의 유역유출계산에 있어서는 식 (1)과 (2)의 유입량과 유출량 및 유역저류량을 유역면적 A로 나누고 단위를 환산하여 유효유출고 q_l(mm/hr)과 유역저류고 s_l(mm)로 바꾸어 다음과 같이 사용한다.

$$s_l = Kq_l^P \qquad (3)$$

* 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 한양대학교 대 학 원 토목공학과 석사과정

$$r_{ave} - q_l = \frac{ds_l}{dt} \tag{4}$$

또한, 강우초기에는 $f = f_1$ (일차유출률)으로 유출역에서만 유출이 발생하고, 누가우량이 포화우량 R_{sa}를 초과하면 $f = f_{sa}$ (포화유출률, ≒1.0)로 되어 나머지 면적인 침투역에서도 유출이 발생하는 것으로 본다. 유출량 계산에서는 유출역과 침투역의 유출을 각각 계산하고 기저유출량을 더하여 다음과 같이 계산한다.

$$O = \frac{A}{3.6}[f_1 q_l + (1 - f_1) q_{sa,l}] + O_i \tag{5}$$

여기서, O는 유역유출량, O_i는 기저유량이며, $q_{sa,l}$은 포화우량 이후의 강우로 계산한 침투역에서의 유출고이다.

식 (1)과 (2)에서는 유출률을 포화우량 전·후시점으로 구분하여 일정한 값을 사용하므로 유역의 손실을 효과적으로 표현하지 못하며, 유역의 저류상태에 따른 지체시간의 변화도 고려되지 않는다(이정규 등, 1994). 그러므로 본 연구에서는 이러한 문제들을 해결하기 위하여 식(4)와 식(5)를 다음과 같이 수정한다.

$$f\, r_{ave} - q_l = \frac{ds_l}{dt} \tag{6}$$

$$O = \frac{A}{3.6} f_2\, q_l + O_i \tag{7}$$

여기서 f_2는 변동유출률이다(이정규 등, 1994).

하도저류함수모형은 다음과 같은 부정류의 지배방정식으로 구성된다.

$$S_l = K' O_l^{P'} - T_l' O_l \tag{8}$$

$$I - O_l = \frac{dS_l}{dt} \tag{9}$$

여기서, I는 유입량이며, K'와 P'은 하도저류함수의 매개변수이고, T_l'은 하도의 지체시간이다. 식(8)에 의하면 유량이 매우 커질 때, 유량이 증가함에 따라 저류량이 감소하는 결과가 나타나는데, 이것은 유량이 커지면 T_l'이 감소하는 자연현상을 무시하고 매개변수를 상수로 취급하기 때문에 발생되는 것이다(이창해, 1996).

이와 같이 매개변수를 상수로 취급하면 실제 수문현상에 부합되는 결과를 얻기 힘들다. 따라서 오차 및 모형의 비합리성을 개선하기 위해 매개변수를 시간에 따라 변화하는 시변성 매개변수로 취급하는 것이 적절하다고 사료된다.

3. 매개변수의 최적화

현재, 매개변수의 결정법에는 경험식에 의한 방법(建設省水文研究會, 1971, 댐운영처, 1993), 도해법에 의한 방법, 최적화기법에 의한 방법(남궁달, 1985) 등이 있다. 경험식에 의한 방법은 일부 하천에 국한되어 있고, 각각의 호우사상에 따른 매개변수의 변동이 고려되지 않는다. 도해법에 의한 방법은 많은 시간과 노력이 필요하고, 객관성이 떨어지는 등, 실제 적용시 많은 문제점이 있다. 최적화기법에 의한 방법은 근래 컴퓨터의 발달 등으로 여러 수문모형에 널리 적용되고 있다.

본 연구의 최적화기법으로는 포물선내삽(parabolic interpolation)을 이용한 Brent법(Press 등, 1986)을 이용한다. 유역저류함수에서 저류고와 유출고는 멱회귀곡선(power regression curve)의 형상을 지닌다. 이 멱회귀곡선식의 상관계수가 최대가 될 때의 지체시간(T_l)이 최적지체시간이 되며, 이때 종속적으로 매개변수 K와 P의 최적치가 결정된다. 일차유출률(f_1)과 포화우량(R_{sa})은 앞서 결정된 매개변수와 수문자료로부터 Brent법을 2차원으로 확장하여 결정한다(이창해, 1996). 또한 하도저류함수의 매개변수인 K', P'과 T_l'도 위의 방법으로 결정한다. 이러한 방법으로 본 연구에서는 적용유역에 대한 여러 수문사상의 매개변수를 구하여 그 평균값을 매개변수의 초기값으로 사용하였다.

4. 퍼지기법의 도입

현재 한강유역 등에 적용하고 있는 저류함수모형을 사용하여 홍수예경보업무를 시행함에 있어 유출량의 실측값과 계산값과의 차이를 감소시키기 위해 숙련된 수문기술자의 경험적 판단에 의한 매개변수의 수동보정에 의존하고 있는 실정이다. 그러나 이와 같은 방법은 정확성, 객관성 확보의 측면에서, 또한 경험이 풍부한 수문기술자의 충분한 확보 등에서 문제점과 어려움이 있다. 그러므로 전문가의 경험 및 제어지식, 조작자의 기능을 추출할 수 있는 퍼지기법을 도입하여 매개변수를 자동보정함으로써 전술한 문제점들을 개선하고자 한다.

본 연구에서 사용되는 퍼지추론방법은 가장 널리 이용되고, 연산과정이 비교적 간단한 Mamdani의 추론법(이광형 등, 1991, Yager 등, 1994)이다. 저류함수모형의 매개변수 중 퍼지제어의 대상이 되는 시변성 매개변수는 유역저류함수의 K와 f_2, 하도저류함수의 K'이다. 퍼지제어의 입력값 e는 다음과 같이 각각 계산된다.

$$e_K(t) = q_l(t) - \frac{q_m(t)}{f} \tag{10}$$

$$e_f(t) = O_c(t) - O_m(t) \tag{11}$$

$$e_{K'}(t) = O_c(t) - O_m(t) \tag{12}$$

여기서, q_m과 O_m은 각각 직접유출고와 유출량의 관측값이고 O_c는 계산유출량이다.

오차의 추세를 나타내는 Δe는 각각의 입력값에 대해 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t - \Delta t) \tag{13}$$

이러한 방법으로 구한 각각의 e와 Δe로부터 퍼지추론의 출력인 변화량 ΔB와 조정량 B를 Mamdani의 추론을 이용하여 계산한다.

5. 모형의 적용

본 연구의 대상유역은 IHP수문조사사업의 대표유역 중 하나인 위천유역이다(그림 1 참조). 미성수위표지점(③)까지의 유역에 대해서는 유역저류함수모형을 이용하여 유출량을 계산하였으며, 미성수위표지점과 무성수위표지점(①)간의 구간에 대하여는 유역저류함수모형을 이용한 잔유역 유출량계산과 함께 하도저류함수모형을 이용한 하도유출량계산을 동시에 수행하였다. 대상호우로는 호우나 유량에 결측값이 없고 첨두유량이 비교적 커서 홍수수문현상에 부합되는 1993년도의 6월 27일, 7월 13일, 7월 28일, 9월 16일 등의 4개 호우사상이다(건설부, 1993). 무성수위표지점의 총 유출량으로부터 잔유역의 유출량과 하도의 유출량을 분리하기 위하여 경험식에 의한 지체시간(댐 운영처, 1993)을 고려한 다음과 같은 방법을 사용하였다.

$$O_r(t) = O_1(T_{l,e}' + t) - O_3(t) \tag{14}$$

$$O_s(t) = O_1(t) - O_r(t) \tag{15}$$

$$T_{l,e}' = 0.00165 \times L' \times I'^{-0.5} \tag{16}$$

여기서 O_r은 잔유역의 유출량, O_s는 하류유출량 중 상류유입량에 의한 유량성분, O_1과 O_3는 각각 1번 지점과 3번 지점에서의 유출량이고, $T_{l,e}'$은 경험식에 의한 하도의 지체시간(hr)이며, L'은 하도연장(km), I'은 하도의 평균경사이다.

각각의 호우사상에 대하여 위의 방법으로 유입, 유출량을 계산하고, 이를 이용해 최적화기법으로 유역 및 하도저류함수의 매개변수를 산정한 후, 그 평균값을 그 유역의 대표값인 대표매개변수로 이용하였다. 표 1~3은 본 연구에 이용된 호우사상에 대한 최적매개변수와 대표매개변수이다. 퍼지기법을 이용하는 경우에는, 대표매개변수를 매개변수의 초기값으로 채택하였으며 유역저류함수의 매개변수 중 K와 f_2, 하도저류함수의 매개변수 중 K'을 시변성 매개변수로 하여 퍼지제어에 의한 자동보정을 수행하여 유역과 하도구간에서의 유출량을 각각 계산하였다. 그림 2~4는 본 모형과 기존모형의 결과 및 실측값을 비교한 것으로 첨두홍수량의 크기, 전체적인 유출의 재현성에서 상당한 개선이 이루어졌음을 알 수 있다.

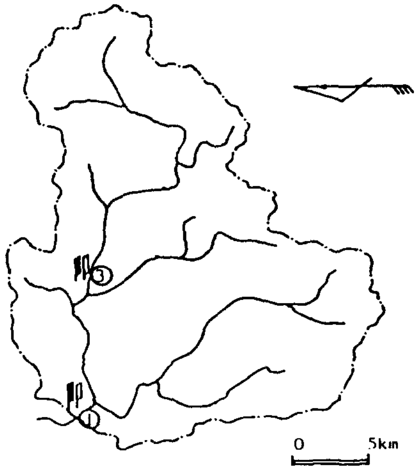


그림 1. 위천유역 현황도(①:무성수위표, ③:미성수위표)

표 1. 위천 미성 수위표 유역의 1993년 강우 사상별 최적매개변수

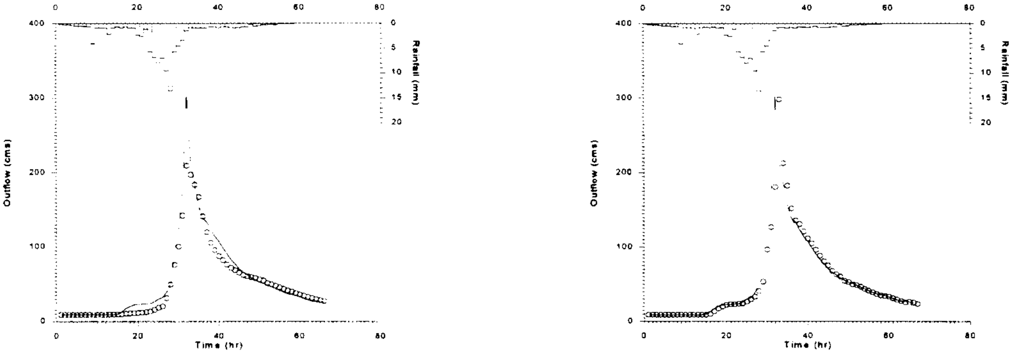
매개변수 / 강우사상	T_l (hr)	K	P	R	f_1	R_{sa} (mm)	f
6월 27일	3.7354	23.7801	0.37740	0.98552	0.63913	64.0391	0.76403
7월 13일	3.5569	50.9099	0.19067	0.95771	0.39667	31.3253	0.92868
7월 28일	4.0001	18.0948	0.46884	0.91624	0.58252	100.4721	0.64796
9월 16일	4.3603	10.7288	0.30780	0.86594	0.44800	33.3219	0.66223
평균값	3.9132	25.8784	0.33618	0.93135	0.51658	57.2896	0.75073

표 2. 위천 미성 수위표와 무성 수위표간 잔유역의 1993년 강우사상별 최적매개변수

매개변수 / 강우사상	T_l (hr)	K	P	R	f_1	R_{sa} (mm)	f
6월 27일	4.9742	31.4149	0.29085	0.97186	0.84348	63.4512	0.90023
7월 13일	5.0877	21.9776	0.46834	0.97395	0.52311	115.8176	0.63367
7월 28일	4.7701	17.0614	0.42002	0.88080	0.47240	115.2668	0.56368
9월 16일	5.6985	11.2045	0.26168	0.70743	0.51924	31.7300	0.72369
평균값	5.1326	20.4146	0.36022	0.88351	0.58956	81.5664	0.70532

표 3. 위천 미성 수위표와 무성 수위표간 하도의 1993년 강우사상별 최적매개변수

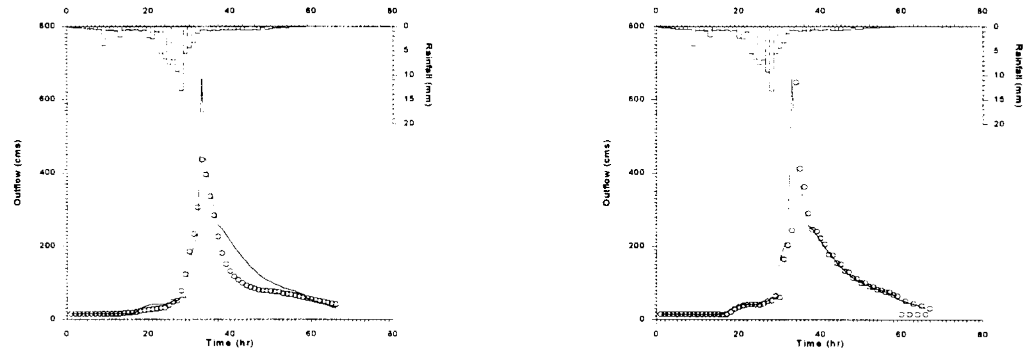
매개변수 / 강우사상	T_l' (hr)	K'	P'
6월 27일	0.0039094	666.5930	1.01612
7월 13일	0.0001736	466.2625	1.22790
7월 28일	0.0062115	692.3750	1.00856
9월 16일	0.0005709	772.5446	0.98575
평균값	0.0027164	649.4438	1.05958



(a) 기존모형 (b) 본 모형

그림 2. 미성수위표에서의 유역홍수추적 결과(1993년 6월 27일 호우사상)

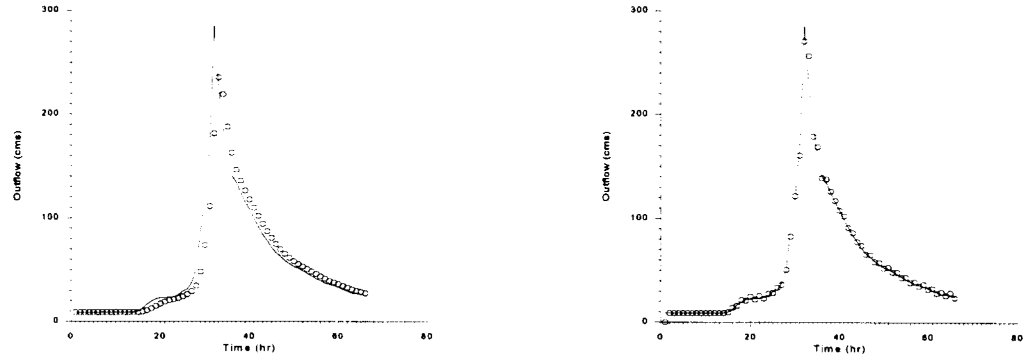
(——— : 실측값, ∘∘∘∘∘ : 계산값)



(a) 기존모형 (b) 본 모형

그림 3. 무성수위표에서의 잔유역홍수추적 결과(1993년 6월 27일 호우사상)

(——— : 실측값, ∘∘∘∘∘ : 계산값)



(a) 기존모형 (b) 본 모형

그림 4. 미성수위표와 무성수위표간 하도홍수추적 결과(1993년 6월 27일 호우사상)

(——— : 실측값, ∘∘∘∘∘ : 계산값)

6. 결 론

본 연구에서는 저류함수모형을 기본으로 하여 홍수량 예측의 정확도를 높이기 위해 퍼지기법을 도입한 수정저류함수모형의 적용성을 검토하였다. 유역과 하도에서 저류함수모형의 매개변수를 최적화함으로써 기존의 방법들에 비해 정확도를 높일 수 있었으며, 홍수량 계산시 퍼지이론을 도입하여 매개변수의 실시간 자동보정을 수행함으로써 보다 정확한 홍수량 예측이 가능하였다. 강우-유출모형에 최적화기법 및 퍼지기법을 도입함으로써 기존모형의 단점인 매개변수산정의 비합리성, 수문기술자의 경험적 판단에 의한 매개변수 보정의 번거로움과 객관성 결여 등의 여러 문제들과 수문현상 자체가 갖는 불확실성을 어느 정도 극복하는 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구는 중소유역의 대표적 호우사상을 이용한 제한된 결과이지만 지속적인 연구와 자료의 보완 등을 통해 한강과 같은 대유역에서의 홍수예경보시스템에 적용도 가능 할 것이다.

7. 참고문헌

건설부 (1993), 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서.

건설부 한강홍수통제소 (1994), 한강홍수예경보.

건설부 낙동강홍수통제소 (1991), 낙동강홍수예경보.

남궁달 (1985), "저류함수법에 의한 강우-유출모형의 변수추정.", 한국수문학회지, 제18권, 제2호, pp. 175-185.

댐운영처 (1993), 다목적댐 홍수유출 해석 및 홍수기 저수지 운영 프로그램 해설서, 한국수자원공사.

이광형, 오길록 (1991), 퍼지이론 및 응용 II, 홍릉과학출판사.

이정규, 이창해, 이종인 (1994), "홍수유출해석에 Fuzzy추론의 적용성.", 1994년도 학술발표회 논문집(II), 대한토목학회, pp. 91-94.

이창해 (1996), "시변성 매개변수를 퍼지제어하는 저류함수모형에 관한 연구", 한양대학교 박사학위논문.

建設省水文硏究會 (1971), 流出計算例題集 II, 全日本建設技術協會.

木村俊晃 (1958), "洪水流出の推定法に關する硏究(1)-貯留關數に關する一考察-.", 土木硏究所報告, 102號の2, pp. 9-16.

木村俊晃 (1961), "貯留關數法(I)-貯留關數法の背景-.", 土木技術資料, 第3卷, 第12號, pp.654-661.

木村俊晃 (1962), "貯留關數法(II)-貯留關數法の基本的構成-.", 土木技術資料, 第4卷, 第1號, pp.41-51.

Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. (1986), Numerical Recipes, Cambridge University Press.

Singh, V.P. (1988), Hydrologic Systems: Volume I Rainfall-Runoff Modeling, Prentice Hall.

Yager, R.R., Zadeh, L.A. (1994), Fuzzy sets, Neural networks and Soft Computing, Van Nostrand Reinhold.