

통합저류함수모형에 의한 홍수추적

○김한섭*, 이정규**

1. 서론

홍수로 인한 재해규모는 산업시설과 경제규모가 커지고 생활수준이 향상됨에 따라 더욱 커지는 경향을 보이고 있으며, 최근에는 내수침수와 지하철 시설의 침수 등, 그 피해내용도 다양화되고 있다. 이와 같은 홍수로 인한 피해를 줄이기 위한 방법에는 댐 건설이나 하천제방 축조 등과 같은 구조물에 의한 구조적 홍수대책 외에 비구조물적 홍수대책 중 하나인 홍수예경보의 정확성을 높여서 재난에 미리 대처하는 것도 적절한 방법이 될 수 있다.

현재, 국내 주요 하천의 홍수예경보시스템의 운영과 다목적댐의 홍수조절관리에는 수문학적 모형의 하나인 저류함수모형(storage function model: SFM)을 사용하고 있다. 저류함수모형을 홍수유출현상에 적용하는데 있어 가장 어려운 점은 매개변수를 결정하는 것이다. 현재, 매개변수들을 결정할 수 있는 객관적이고 합리적인 방법이 제시되어 있지 않기 때문에 모형의 매개변수를 결정할 때 경험식을 이용하거나, 경험이 풍부한 수문기술자의 판단에 의존하고 있는 실정이다. 또한, 일반적으로 매개변수들은 강우사상별로 다를 뿐 아니라 동일한 강우라 할 지라도 시간에 따라 변하는 시변성(time variant)인 특성을 가지고 있음에도 불구하고 이들 매개변수들을 상수로 취급하고 있으며, 이는 지금까지는 시변성인 매개변수를 효과적으로 추적하여 제어할 수 있는 적절한 방법이 없었기 때문이라고 볼 수 있다(이정규, 1994; 이창해, 1995).

또한, 저류함수모형은 유역모형과 하도모형으로 나누어져 있는데, 유역에 대한 저류함수는 강우-유출 자료로부터 쉽게 구할 수 있으나, 하도에서는 유출점에서의 유량이 잔유역으로부터의 유출량을 포함하고 있으므로 하도구간의 상류로부터 유입량과 관측유출량을 분리하기가 어렵다. 그러므로 실제 하천에서 하도저류함수를 정확하게 구할 수 없으므로 본 연구에서는 등가강우강도개념을 도입하여 하도에 쉽게 적용할 수 있는 통합저류함수모형을 제안하였으며, 그 적용타당성을 검토해 보았다. 또한 저류함수법의 매개변수를 결정하는데 있어서 시변성인 매개변수의 특성이 고려될 수 있도록 퍼지기법(fuzzy technique)을 도입하여 예측결과의 정확도를 향상시키고, 경험이 많은 수문기술자의 판단에 의존하는 운용상의 문제점을 보다 객관적이고 효율적인 방법으로 개선하고자 하였다.

본 연구에서 제안된 모형은 비교적 정밀하게 관측된 국제수문개발계획(IHP) 대표유역의 강우-유출 관측자료를 이용하여 모형을 검증하고 모형의 재현성과 정확도를 비교검토 하였다. 또한 국내의 대하천 중 남한강과 낙동강에서 발생한 홍수자료를 이용하여 본 모형의 적용가능성을 검토하였다.

2. 통합저류함수모형

저류함수모형(storage function model: SFM)은 木村(1961a, 1961b)이 제안한 홍수유출모형으로 산지가 많은 유역에 적합토록 개발된 모형이다. 이 방법은 계산절차가 간편하고 홍수유출의 비선형성을 고려할 수 있는 방법이므로 선형모형보다 합리적이라고 알려져 있다. 기존의 저류함수모형은 다음과 같은 유역저류함수모형과 하도저류함수모형으로 구성된다.

* 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

** 한양대학교 공과대학 도시환경건설공학과 교수

(1) 유역저류함수모형

저류량 방정식 : $S_t = KO_t'$ (1)

연속방정식 : $\frac{1}{3.6} f r_{ave} A - O_t = \frac{dS_t}{dt}$ (2)

유출량 계산식 : $O = \frac{A}{3.6} [f_1 q_t + (1 - f_1) q_{sat}] + O_t$ (3)

(2) 하도저류함수모형

저류량 방정식 : $S_t = K' O_t^{P'} - T_t' O_t$ (4)

연속방정식 : $I - O_t = \frac{dS_t}{dt}$ (5)

이와 같이 유역추적과 하도추적으로 구분하여 총유출량을 계산하는 기존의 모형은 유역의 실측 총유출량으로부터 유역내 잔유역 유입성분과 상류 유입량성분을 분리하는 것이 사실상 불가능하므로 유출계산시 불합리한 가정을 할 수밖에 없다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 하도저류함수모형을 사용하지 않고, 상류유입량을 강우로 환산하여 이를 실제강우와 합산하고 유역에 분포시킨 합산강우량과 총유출량의 관계를 이용하여 유출량을 계산하는 통합저류함수로 수정하였다. 또한 기존저류함수모형의 유출량 계산식(3)과 같이 유출역과 침투역으로 나누어 일률적으로 계산함으로써 발생하는 문제점을 개선하기 위하여 시간에 따라 변화하는 변동유출률 f_2 를 도입하고(이정규 등, 1994), 이와 함께 유역의 시간적 변동특성을 고려하기 위하여 매개변수 K를 시변성 매개변수로 하여 이를 퍼지제어에 의해 자동보정 되도록 다음과 같이 수정하였다.

(3) 통합저류함수모형

저류량 방정식 : $s_t = K q_t^P$ (6)

연속방정식 : $f(r_{ave} + r_{eqv}) - q_t = \frac{ds_t}{dt}$ (7)

유출량 계산식 : $O = \frac{A}{3.6} f_2 q_t + O_t$ (8)

식(7)의 r_{eqv} 는 상류유입량을 강우로 환산한 동가강우(equivalent rainfall)로서 다음 식으로 계산된다.

$$r_{eqv} = \frac{3.6Q}{CA} \tag{9}$$

여기서, Q는 상류유입량(m³/s), C는 동가강우 유출계수, A는 유역의 면적(km²)이다. 수정된 모형의 매개변수 K, P, T_t' 등은 최적화 방법에 의하여 계산하며, 그 중 K와 변동유출률 f_2 를 퍼지제어의 대상매개변수로 한다. 이와 같이 수정된 모형은 하도추적과 유역추적을 동시에 수행하도록 구성되어 있으므로, 계산시 번거로움과 잔유역 유입유량의 처리문제 등 기존모형의 문제점을 개선할 수 있으며, 시변성 매개변수의 도입과 퍼지제어에 의한 매개변수의 실시간 자동보정으로 보다 정확한 홍수량 예측을 할 수 있도록 하였다.

3. 매개변수의 최적화

기존의 매개변수 결정법에는 경험식에 의한 방법(建設省水文研究會, 1971; 댐운영처, 1993), 도해법에 의한 방법 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. 근래에는 컴퓨터의 발달 등으로 최적화기법에 의한 방법이 여러 수문모형에 널리 적용되고 있다.

본 연구의 매개변수 결정방법으로는 최적화기법 중 하나인 포물선내삽(parabolic interpolation)을 이용한 Brent법(Press 등, 1992)을 이용하였다(이창해, 1995). 유역저류함수에서 저류고와 유출고

는 멱회귀곡선(power regression curve)의 형상을 지닌다. 이 멱회귀곡선식의 상관계수가 최대가 될 때의 지체시간, T_1 이 최적지체시간이 되며, 이때 종속적으로 매개변수 K 와 P 의 최적치가 결정된다. 이러한 방법으로 본 연구에서는 적용유역에 대한 여러 수문사상의 매개변수를 구하여 그 평균값을 매개변수의 초기값으로 사용하였다.

4. 퍼지제어기법

현재는 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 단순한 문제점들을 개선하고자 한다.

본 연구에서 사용되는 퍼지추론방법은 가장 널리 이용되고, 연산과정이 비교적 간단한 Mamdani의 추론법(이광형과 오길록, 1991; Yager와 Zadeh, 1994)이다. 저류함수모형의 매개변수 중 퍼지제어의 대상이 되는 시변성 매개변수는 통합저류함수의 K 와 f_2 이며, 퍼지제어의 입력값 e 는 다음과 같이 계산된다.

$$e_K(t) = f_2 q_i(t) - q_m(t) \quad (10)$$

$$e_{f_2}(t) = O_c(t) - O_m(t) \quad (11)$$

여기서, q_m 과 O_m 은 각각 직접유출고와 유출량의 관측값이고 O_c 는 계산유출량이다.

오차의 추세를 나타내는 Δe 는 각각의 입력값에 대해 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t - \Delta t) \quad (12)$$

이러한 방법으로 구한 각각의 e 와 Δe 로부터 퍼지추론의 출력인 변화량 ΔB 와 조정량 B 를 Mamdani의 추론을 이용하여 계산한다.

5. 모형의 적용결과 및 고찰

본 연구에서 제안한 통합저류함수모형은 IHP 대표유역 중 위천유역 및 남한강유역과 낙동강유역에 각각 적용하여 그 적용성을 검토하였다(표 1). 대상호우로는 강우나 유량에 결측값이 없고 첨두유량이 비교적 커서 홍수수문현상에 부합되는 호우사상으로, 위천에서 3개(건설부, 1993)와 남한강과 낙동강에서 각각 4개 사상을 선택하였다. 선택한 호우사상과 각각의 최적매개변수가 표 2~4에 정리되어 있다. 모형의 매개변수는 각 유역의 호우사상별 최적매개변수를 구한 후, 그 평균값을 대표매개변수로 취하여 홍수량 계산시 해당 유역의 초기값으로 사용하였다. 모형의 적용방법은 홍수추적 상류시점의 관측유출량을 등가강우 r_{eqv} 로 환산한 후 대상 하도구간의 잔유역에 내린 강우와 합산한 합산강우량과 하류종점의 관측유출량을 이용하여 유출유출량을 계산하였다. 모형의 적용시 퍼지제어에 의한 결과와 제어를 하지 않은 결과를 관측값과 비교하였으며, 그 결과가 그림 1~3에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 관측값과 계산값을 비교해 보면 첨두홍수량의 크기 및 전체적인 수문곡선의 재현성에서 상당히 우수한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

표 1. 통합모형의 적용유역

적용유역	홍수추적구간	유역면적 (km ²)	하도연장 (km)
위천	미성 - 무성	301	11.9
남한강	여주 - 양평	1107	27.6
낙동강	일선교 - 구미	1375	20.9

표 2. 위천유역의 1993년 호우사상별 최적매개변수

호우사상 \ 매개변수	$T_l(\text{hr})$	K	P	f	R
1993년 6월 27일	5.124	20.940	0.296	0.844	0.978
1993년 7월 13일	4.916	21.935	0.350	0.722	0.958
1993년 7월 28일	4.944	15.470	0.399	0.636	0.842
대표 매개변수(평균값)	4.995	19.448	0.348	0.734	0.926

표 3. 남한강하류유역의 호우사상별 최적매개변수

호우사상 \ 매개변수	$T_l(\text{hr})$	K	P	f	R
1995년 8월 8일	0.002	87.017	0.169	0.752	0.722
1995년 8월 19일	0.003	82.220	0.200	0.769	0.682
1997년 6월 30일	0.004	108.668	0.074	0.776	0.672
1997년 8월 3일	0.003	110.026	0.122	0.748	0.717
대표 매개변수(평균값)	0.003	96.983	0.141	0.761	0.698

표 4. 낙동강중류유역의 호우사상별 최적매개변수

호우사상 \ 매개변수	$T_l(\text{hr})$	K	P	f	R
1987년 7월 15일	0.097	125.115	0.095	0.774	0.852
1987년 7월 22일	4.000	17.902	0.544	0.592	0.862
1987년 8월 4일	0.004	43.369	0.151	0.815	0.568
1987년 8월 28일	0.005	96.291	0.212	1.000	0.818
대표 매개변수(평균값)	1.027	70.669	0.250	0.795	0.775

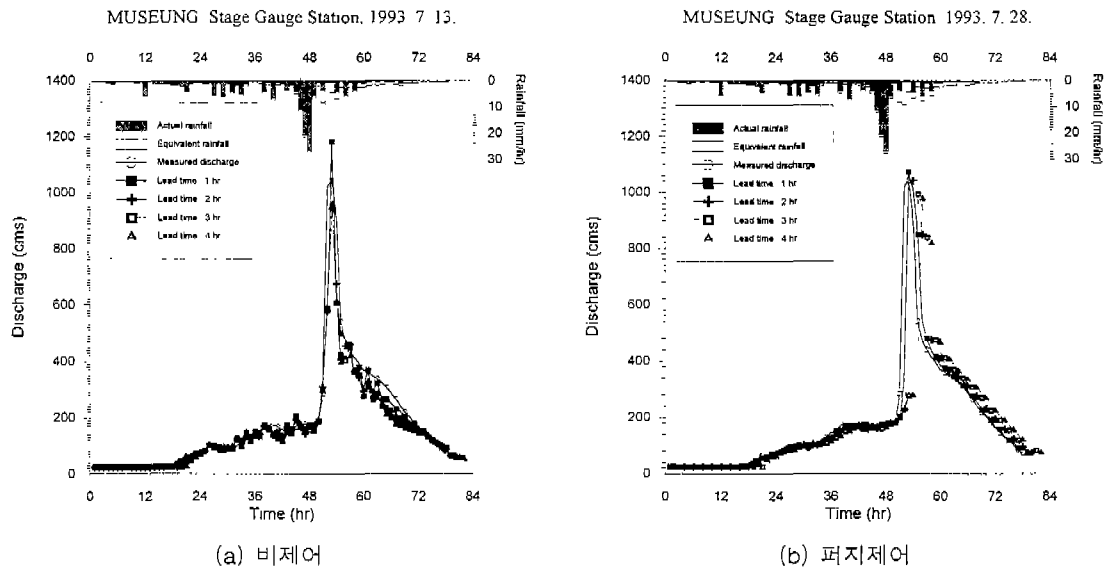
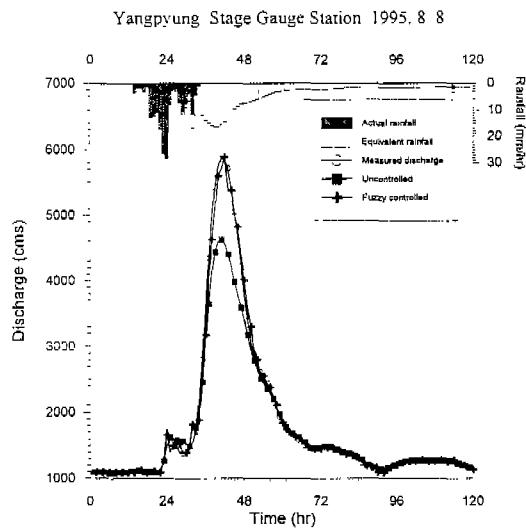
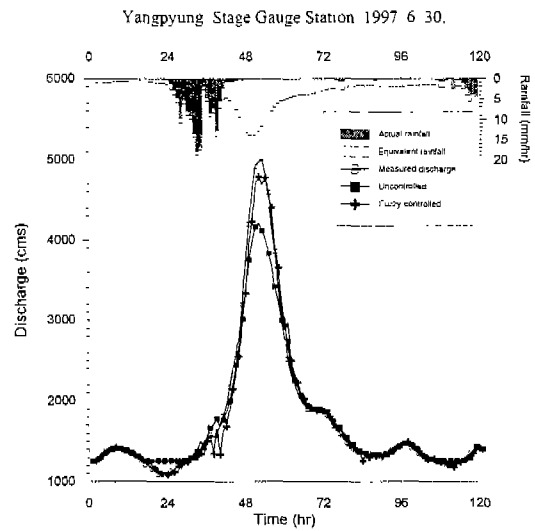


그림 1. 위천 무성수위표 지점의 1993년 7월 13일 홍수추적 결과

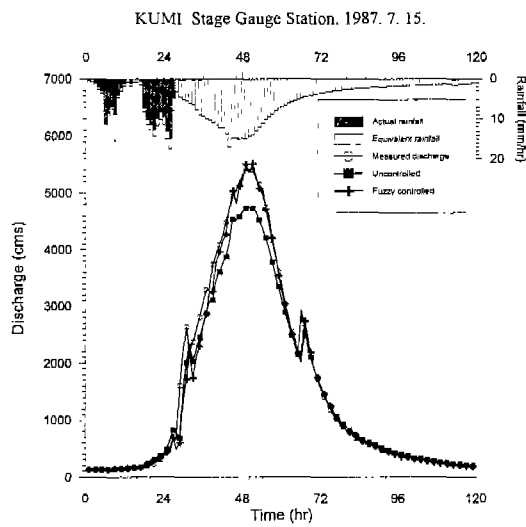


(a) 1995년 8월 8일 홍수추적 결과

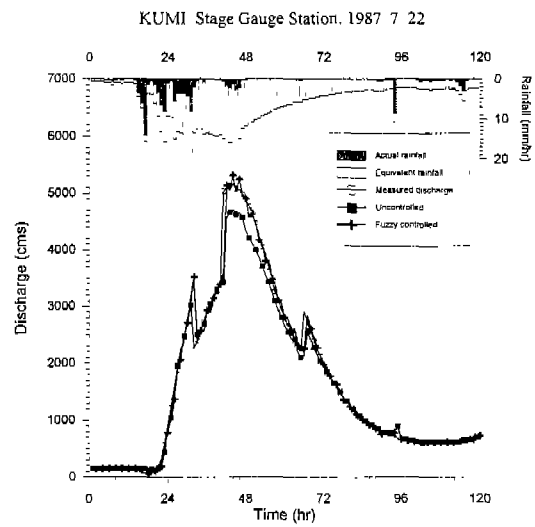


(b) 1997년 6월 30일 홍수추적 결과

그림 2. 낙한강 양평 수위관측소 지점의 홍수추적 결과



(a) 1987년 7월 15일 홍수추적 결과



(b) 1987년 7월 22일 홍수추적 결과

그림 3. 낙동강 구미 수위관측소 지점의 홍수추적 결과

6. 결 론

저류함수모형은 국내 주요 하천의 홍수에경보시스템에서 채택하고 있는 강우-유출모형이다. 저류함수모형이 내재하고 있는 문제점은 대상유역에 적절한 저류함수의 매개변수를 객관적으로 결정하기 어렵고, 또한 하도모형에서는 잔유역으로부터의 유입량을 합리적으로 처리하기 어렵다는 것이다. 일반적으로 저류함수모형과 같은 수문학적 강우-유출모형은 복잡한 수문현상을 단순화했기 때문에 사용하기는 쉽지만 모형의 재현성이 떨어진다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이

와 같은 문제점을 개선하고 홍수예보의 정확성을 높일 수 있도록 유역과 하도추적에 함께 적용할 수 있는 통합저류함수모형을 제안하였다. 본 모형에서는 하도의 상류단 유입량을 등가강우강도로 환산처리 하였으며, 매개변수의 결정에는 최적화기법을 도입하였고, 시변성인 매개변수 K 와 변동 유출을 f_2 를 퍼지제어기법을 도입하여 효과적으로 제어하였다. 본 연구에서 수립한 통합모형의 적용타당성을 검토하기 위하여 IHP 대표시험유역인 위천 및 남한강과 낙동강유역의 하도구간에 적용한 결과, 퍼지제어를 실시하지 않은 비제어시 수문곡선과 제어시의 수문곡선을 관측홍수 수문곡선과 비교할 때 퍼지제어를 실시한 경우가 훨씬 양호한 결과를 보여 주었으며, 퍼지제어의 효과는 첨두홍수량의 계산시에는 아주 뚜렷하였으나 첨두발생은 예보선행시간이 길수록 위상오차가 발생하는 문제점이 나타났다. 본 연구에서 제안한 통합저류함수모형은 적용 하도구간에서는 홍수유출 현상을 성공적으로 재현하고 있지만, 하천수계 전체에 대한 홍수예경보시스템의 강우-유출모형으로 사용하기 위해서는 모형의 정확성을 좀 더 높일 수 있도록 등가강우강도, 예보선행시간, 퍼지제어기법, 축적계수 결정 등에 관한 지속적인 연구가 필요하며, 보다 많은 하천유역과 강우사상의 적용에 의한 모형의 보완 및 개선이 필요할 것이다.

7. 참고문헌

- 건설부 (1993). 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서.
- 댐운영처 (1993). 다목적댐 홍수유출 해석 및 홍수기 저수지 운영 프로그램 해설서. 한국수자원공사.
- 이광형, 오길록 (1991). 퍼지이론 및 응용 II. 홍릉과학출판사.
- 이정규 (1994). "수자원사업에 필요한 수문설계 전산모형 개발 - 퍼지추론의 도입 -." 국제수문개발 계획 연구보고서. 건설부.
- 이정규, 이창해, 이종인 (1994). "홍수유출해석에 Fuzzy추론의 적용성." 1994년도 학술발표회 논문집(II), 대한토목학회, pp. 91-94.
- 이창해 (1995). 시변성 매개변수를 퍼지제어하는 저류함수모형에 관한 연구. 박사학위논문, 한양대학교.
- 建設省水文研究會 (1971). 流出計算例題集 II. 全日本建設技術協會.
- 木村俊晃 (1961a). 貯留關數による洪水流出追跡法. 建設省 土木研究所.
- 木村俊晃 (1961b). "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.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. (1992). *Numerical Recipes*, Cambridge University Press.
- Yager, R.R., Zadeh, L.A. (1994). *Fuzzy Sets, Neural Networks and Soft Computing*, Van Nostrand Reinhold.