

홍수예보를 위한 통합저류함수모형의 퍼지제어 (II)

- 이론 및 모형의 수립 -

Integrated Storage Function Model with Fuzzy Control for Flood Forecasting (II)

- Theory and Proposal of Model -

이 정 규* / 김 한 섭**

Lee, Jong-Kyu / Kim, Hansup

Abstract

Integrated storage function model (ISFM) is applied to some rainfall-runoff events of the selected basins in Korea to show validity of the proposed model. Comparing the numerical results of the model with the field measurements, the simulated hydrographs and peak flood discharges for the most part showed good agreements, except the occurrence time of the peak discharges which showed a bit discrepancy, and they showed it was very hard to have a sufficient lead-time to forecast the flood when the upstream inflow of the channel reach was more dominant than the inflow from the residual watershed of the channel.

keywords : ISFM, peak flood discharge, lead-time

요 지

통합저류함수모형을 IHP 대표유역인 위천과 보청천유역 그리고 대유역인 남한강유역과 낙동강유역의 강우-유출사상에 적용하여 모형의 타당성을 검토하였다. 제안된 모형에 의한 예측 결과와 관측치를 비교해 볼 때 전체적인 수문곡선의 재현성 및 첨두홍수량의 예측에 있어서 상당히 우수한 결과를 나타내었다. 그러나 첨두홍수 발생 시간에서는 퍼지제어의 효과로 인해 다소 오차가 발생하였다. 또한 상류단 유입량이 잔유역 유입량에 비하여 상당히 큰 경우에는 충분한 예보선행시간을 확보하기 어려운 문제점이 나타났다.

핵심용어 : 통합저류함수모형, 첨두홍수량, 예보선행시간

* 한양대학교 공과대학 도시환경건설공학파군 교수

Professor, Division of Urban Planning, Environmental and Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea (E-mail : leejk@email.hanyang.ac.kr)

** 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

Doctoral Student, Department of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea (E-mail : hskim815@hymail.hanyang.ac.kr)

1. 모형의 적용방법 및 평가

본 연구(Ⅰ)에서 제안된 통합저류함수모형(이정규와 김한섭, 2000)의 적용타당성을 검토해 보기 위하여 실제 유역의 강우자료와 하도구간의 유출입유량을 사용하였다. 통합모형의 매개변수는 호우사상별로 각각 최적매개변수값을 구하였으며, 유출량 계산에는 최적매개변수의 평균값을 초기값으로 사용하였다.

연구(Ⅰ)에서 언급된 바와 같이 퍼지제어를 위해서는 입력변수가 필요한데 본 연구에서는 오차 e 와 오차의 추세 Δe 를 사용하였다. 제안된 모형에서 퍼지제어의 대상이 되는 K 와 f_2 의 퍼지제어 입력 e 는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$e_K = q_t - \frac{q_m}{f_2} \quad (1)$$

$$e_{f_2} = Q_c - Q_m \quad (2)$$

여기서, q_t 는 계산유출고(mm), q_m 는 관측유출고(mm), Q_c 는 계산유출량(m^3/sec)이며, Q_m 는 관측유출량(m^3/sec)이다.

오차의 추세 Δe 도 K 와 f_2 에 따라 각각 계산된다. 퍼지제어의 입력변수인 e 와 Δe 는 scale mapping이 필요하므로 다음과 같이 축척계수(scale factor)를 사용하여 변환하여야 한다.

$$e_K^* = \alpha_1 \cdot e_K \quad (3)$$

$$\Delta e_K^* = \beta_1 \cdot \Delta e_K \quad (4)$$

$$\Delta B_K = \gamma_1 \cdot \Delta B_K^* \quad (5)$$

$$e_{f_2}^* = \alpha_2 \cdot e_{f_2} \quad (6)$$

$$\Delta e_{f_2}^* = \beta_2 \cdot \Delta e_{f_2} \quad (7)$$

$$\Delta B_{f_2} = \gamma_2 \cdot \Delta B_{f_2}^* \quad (8)$$

여기서, α , β , γ 는 각각의 입·출력변수에 대한 축척계수이며, 아래첨자 1과 2는 각각 매개변수 K 와 f_2 에 해당하는 축척계수임을 나타낸다. *로 표시된 변수들이 퍼지추론의 실제 입·출력값이다. 축척계수를

결정하는 분명한 방법이나 이론이 아직 정립되어 있지 않으므로 본 연구에서는 각 축척계수 별로 0.01 씩 변화시켜 나가면서 대상유역에서 가장 적절한 값을 찾는 시행착오를 통해 각 대상구간에 대한 축척계수를 결정하였다. 또한 하도구간의 상류단 유입량의 등가강우강도 환산시 유출계수 C 는 1.0을 사용하였다.

$$r_{eqv} = \frac{3.6Q}{CA} \quad (9)$$

하도구간의 하류단 유출량을 계산하기 위해서 통합모형의 저류함수식을 연속방정식에 대입하여 정리한 아래와 같은 차분식을 사용하였다.

$$0.5q_{l,i+1} + \frac{K}{\Delta t} q_{l,i+1}^p = f(r_{ave} + r_{eqv})_i - 0.5q_{l,i} + \frac{K}{\Delta t} q_{l,i}^p \quad (10)$$

시간 t 에서 $r_{ave,i}$ 와 $r_{eqv,i}$ 는 예보선행시간 L_t 를 고려하여 나타내면 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} r_{ave,i}(t) &= r_{ave}(t - L_t) \\ r_{eqv,i}(t) &= r_{eqv}(t - L_t) \end{aligned} \quad (11)$$

본 연구에서 제안한 통합모형의 적용타당성을 검토하기 위하여 실제유역에 적용한 결과를 관측값과 비교 검토하였다. 적용방법으로는 예보선행시간을 달리하여 통합모형의 매개변수를 퍼지제어하는 경우와 퍼지제어하지 않는 경우로 나누어 통합모형의 적용성을 검토하였다. 본 연구에서는 기존의 저류함수모형의 경우와는 비교하지 않았다. 왜냐하면 하도모형의 매개변수를 결정하기 위해서는 대부분의 하도에서 관측유출량으로부터 잔유역의 유입량 성분과 상류단 하도유입량 성분을 분리하여야 하지만, 이것은 현실적으로 불가능하기 때문에 기존의 하도저류함수모형의 최적매개변수를 결정할 수 없으며, 따라서 경험식으로 구한 매개변수를 이용한 기존 모형의 적용결과를 통합모형의 결과와 비교했을 때 객관적인 평가가 어렵기 때문이다. 모형의 예측결과의 적용성을 알아보기 위하여 침투유량과 침투 발생시각을 비교 평가하였다. 홍수예보의 관점에서는 침투유량과 침투발생시각의 정확성이 중요하므로, 이들의 비교기준으로 다음 식을 사용하였다(Yen, 1981).

$$E_{Qp} = \frac{Q_{cp} - Q_{mp}}{Q_{mp}} \quad (12)$$

$$E_{tpa} = t_{cp} - t_{mp} \quad (13)$$

여기서, Q_{cp} 는 계산침투유량이며, Q_{mp} 는 관측침투유량이고, E_{tpa} 는 침투발생시간의 오차, t_{cp} 는 계산침투발생시간, t_{mp} 는 관측침투발생시간이다.

2. 적용구역과 강우 및 결과

본 연구의 통합모형은 IHP 대표유역인 위천유역 및 한강유역과 낙동강유역에 대하여 적용하여 모형의 타당성을 검토하였다. 모형의 적용방법은 홍수추적구간의 하도 상류지점 관측유입량을 등가강우 r_{eq} 로 환산한 후 대상 하도구간의 잔유역에 내린 강우와 합산한 총 강우량과 하도 하류지점의 관측유량을 이용하여 유출유량을 계산하였다. 유출계산시 매개변수의 초기값은 각 유역의 호우사상별로 구한 최적매개변수의 평균값을 대표매개변수로 사용하여 유출계산을 수행하였으며, 모든 매개변수를 상수로 하여 모의한 결과 및 시변성 매개변수 K , f_2 를 퍼지제어에 의해 계산시간 간격인 1시간 마다 자동보정하여 얻어진 결과를 관측유출량과 비교하였다. 예보선행시간은 IHP 유역의 경우 1~4시간, 한강과 낙동강의 경우 1시간을 적용하였다.

2.1. 위천 유역

2.1.1. 유역개요 및 대상강우

위천 대표유역의 유역면적은 473 km², 유로연장이 42.8 km이다. 본 연구의 홍수추적구간은 위천 유역의

미성수위표 지점과 무성수위표 지점간의 소유역으로 잔유역면적이 301 km²이며 유로연장이 11.9 km이다 (건설부, 1983). 강우사상은 1993년의 주요 호우사상 중 강우자료와 유량자료에 결측이 없고, 유출량이 비교적 커서 홍수수문현상에 부합되는 3개의 호우사상을 이용하였다(건설부, 1993).

2.1.2. 적용결과 및 고찰

본 연구의 통합모형을 위천유역에 적용하여 얻어진 계산결과를 관측홍수량과 비교하여 고찰해 본다. 통합모형은 퍼지제어와 비제어로 구분하여 적용하였다.

표 1은 강우사상별로 구한 최적매개변수인데 매개변수에 따라 분포차이를 보이고 있으며, 특히 K 값의 변동이 크다. 이것을 볼 때 모형의 매개변수 K 를 상수로 취급하는 것은 문제가 있음을 알 수 있다. 표 2는 모형을 적용하기 위하여 사용된 축척계수(scale factor)이다. 표 3과 표 4는 침투유량과 침투발생시간의 오차를 퍼지제어를 실시한 경우와 비제어의 경우로 구분하여 비교한 것이다. 표 3과 표 4는 예보선행시간이 1시간과 3시간인 경우만을 대표적으로 정리한 것이다(그림 1~3 참조). 침투유량의 예측결과는 퍼지제어를 실시한 경우가 비제어의 경우보다 아주 우수하게 나타났으나 그림 1의 (b)에서 예보선행시간이 4시간인 경우 계산유출량에 진동(oscillation)이 발생하는 것을 볼 수 있는데 이는 계산유출량과 관측유출량 간의 차이가 커서 이를 제어하는 과정에서 과제어(overshoot)가 발생한 경우이다. 이와 같은 진동은 축척계수를 적절히 조정하여 제거할 수 있으나, 본 연구에서는 홍수

표 1. 위천유역의 1993년 호우사상별 최적매개변수

호우사상 \ 매개변수	T_i (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 2. 위천유역의 scale factor

α_1	β_1	α_2	β_2	γ_1	γ_2
50.0	25.0	0.5	0.25	5.0	0.01

표 3. 통합모형에 의한 위천유역의 호우사상별 오차(예보선행시간 : 1 hr)

호우사상	오차지표	E_{QP}		E_{TPa} (hr)	
		비 제어	퍼지제어	비 제어	퍼지제어
1993년 6월 27일		-0.33754	-0.02736	1.00000	1.00000
1993년 7월 13일		0.13388	0.02973	0.00000	0.00000
1993년 7월 28일		0.17626	0.45710	44.00000	0.00000
평 균(절대값)		0.21589	0.17140	15.00000	0.33333

표 4. 통합모형에 의한 위천유역의 호우사상별 오차(예보선행시간 : 3 hr)

호우사상	오차지표	E_{QP}		E_{TPa} (hr)	
		비 제어	퍼지제어	비 제어	퍼지제어
1993년 6월 27일		-0.46969	-0.08443	0.00000	3.00000
1993년 7월 13일		-0.08565	-0.04654	0.00000	2.00000
1993년 7월 28일		0.06801	0.04426	0.00000	0.00000
평 균(절대값)		0.20778	0.05841	0.00000	1.66667

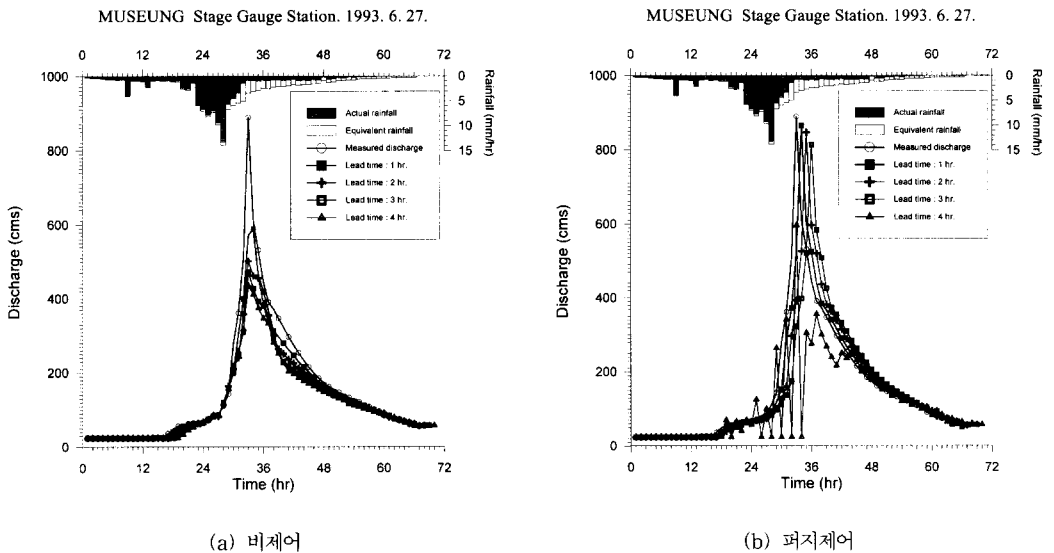
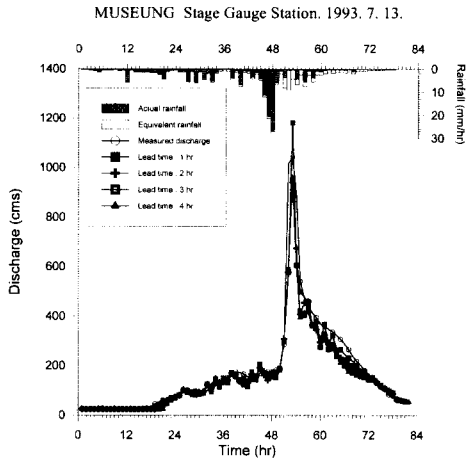


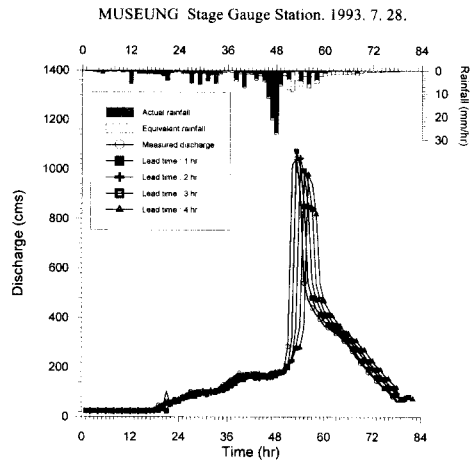
그림 1. 위천 무성수위표 지점의 1993년 6월 27일 홍수추적 결과

유출량의 예측을 목적으로 하므로 각 유역별로 단일한 축척계수를 이용하였다. 침투발생시간은 퍼지제어를 실시한 경우에 관측치와 비교하여 위상오차가 나타났으며 예보선행시간이 길수록 오차가 더욱 커지는 경향을

보여 주었다. 이것은 퍼지제어의 과정에서 생기는 문제점으로 생각되며 예보선행시간이 길어질수록 퍼지제어의 효과가 감소함을 의미하는 것이다. 다시 말하면 강우로 인한 현재 유역의 유출특성이 예보선행시간 만큼

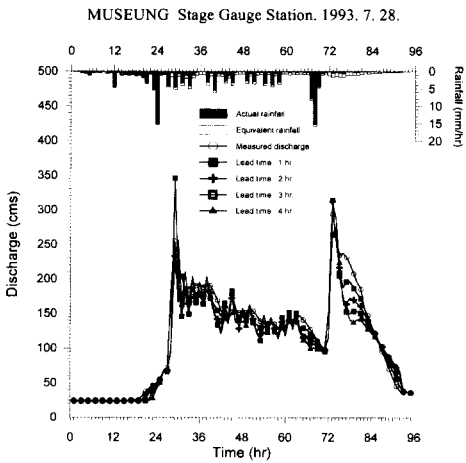


(a) 비제어

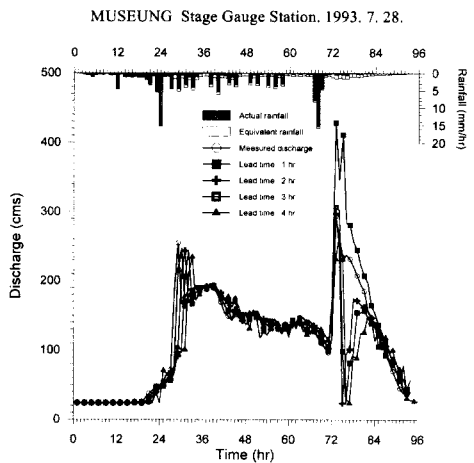


(b) 퍼지제어

그림 2. 위천 무성수위표 지점의 1993년 7월 13일 홍수추적 결과



(a) 비제어



(b) 퍼지제어

그림 3. 위천 무성수위표 지점의 1993년 7월 28일 홍수추적 결과

경과한 후에는 다르기 때문에 그만큼 유출특성의 반영에 지체가 생기기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 앞으로 퍼지제어규칙의 개선이나 추론방법의 개선에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 전체적인 면에서 수문곡선을 비교해보면 퍼지제어를 실시했을 때의 예측결과가 관측수문곡선에 양호하게 일치하고 있음을 보여준다.

2.2. 남한강유역과 낙동강유역

2.2.1. 유역개요 및 대상강우

1) 남한강유역

남한강의 총유역면적은 12,514 km²이고 유로연장이 375 km이다. 본 연구에 적용한 홍수추적구간은 남한강의 하류에 위치한 여주 수위관측소와 양평 수위관측

소 사이의 27.6 km의 하도구간으로 잔유역 면적은 1,107 km²이다(한강홍수통제소, 1997). 대상 강우는 1995년과 1997년의 주요강우사상을 2개씩 선정하였다. 강우 및 수위자료는 한국건설기술연구원의 수문 DB를 이용하였다.

2) 낙동강유역

낙동강의 총유역면적은 23,817 km²이며 유로연장은 521.5 km이다. 본 연구를 적용한 홍수추적구간은 낙동강 중류에 위치한 일선교 수위관측소와 구미 수위관측소 간의 20.9 km의 하도구간으로 잔유역의 면적은 1,375 km²이다(낙동강홍수통제소, 1997). 대상 강우는 1987년의 주요 호우사상 중 4개 강우사상을 선정하였다. 강우 및 수위자료는 한국건설기술연구원의 수문 DB를 이용하였다.

2.2.2. 적용결과 및 고찰

본 연구의 통합모형을 남한강유역과 낙동강유역에 적용하여 얻어진 계산결과를 관측홍수량과 비교 고찰해 본다. 통합모형은 퍼지제어와 비제어로 나누어 적용하였다. 이들의 적용결과를 비교해 볼 때 남한강구간과 낙동강구간의 경우에 비슷한 특성을 보이고 있으므로 두 경우를 같이 고찰해 본다.

표 5와 표 6는 강우사상별로 구한 최적매개변수값으

로 이들은 IHP 대표유역의 경우와 비슷한 경향을 보여준다. 즉, 매개변수들은 강우사상별로 분포차이를 보이고 있으며, 특히 K 의 변동이 큰 것이 특징이다. 여기서도 모형의 매개변수 K 를 상수로 취급하기는 어렵다고 생각된다. IHP 유역의 경우와 큰 차이를 나타내는 것은 각 호우사상별 상관계수 R 이 0.56~0.85 정도로 낮게 나타났다. 이것은 저류량을 나타내는 자료가 널리 산포되어 있거나, 또는 저류함수식을 한 개의 일가함수식으로 나타내기 어렵다는 것을 시사해 주는 점이다. 또한 지체시간 T_i 이 0 에 가까운 값을 나타내는 것은 상류단 유입량이 잔유역의 유입량에 비하여 상대적으로 훨씬 크기 때문에 잔유역 유입량에 의한 영향이 크지 않음을 의미한다. 다시 말하면 한강구간(여주-양평)과 낙동강구간(일선교-구미)에서는 지체시간이 거의 발생하지 않는다. 그러므로 잔유역 유입량이 상대적으로 작을 때에는 홍수예보시간을 충분히 확보하기 어렵다고 생각된다. 표 7은 모형을 적용하기 위하여 두 구간에 공통적으로 사용된 축척계수이다. 예보 선행시간은 1시간을 적용하였다. 표 8과 표 9는 침투유량과 침투발생시각의 오차를 퍼지제어와 비제어로 나누어 비교한 것이다(그림 4 ~ 5 참조). 아래의 표와 그림에서 알 수 있듯이 상관계수 R 이 크지 않음에도 불구하고 퍼지제어를 행한 경우가 비제어의 경우에 비하여 침투유량과 침투발생시각의 관측값과 아주 양

표 5. 남한강하류유역의 호우사상별 최적매개변수

호우사상 \ 매개변수	T_i (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	0.70

표 6. 낙동강중류유역의 호우사상별 최적매개변수

호우사상 \ 매개변수	T_i (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)	1.037	70.67	0.250	0.80	0.78

표 7. 남한강유역과 낙동강유역의 scale factor

α_1	β_1	α_2	β_2	γ_1	γ_2
50.0	25.0	0.5	0.25	1.3	0.06

표 8. 통합모형에 의한 남한강하류유역의 호우사상별 오차

호우사상 \ 오차지표	E_{Op}		E_{Ips} (hr)	
	비제어	퍼지제어	비제어	퍼지제어
1995년 8월 8일	-0.20926	0.00575	0.00000	1.00000
1995년 8월 19일	-0.17014	0.09539	1.00000	1.00000
1997년 6월 30일	-0.16132	-0.04544	-1.00000	-1.00000
1997년 8월 3일	-0.17803	-0.02684	-1.00000	1.00000
평 균(절대값)	0.17969	0.04336	0.75000	1.00000

표 9. 통합모형에 의한 낙동강중류유역의 호우사상별 오차

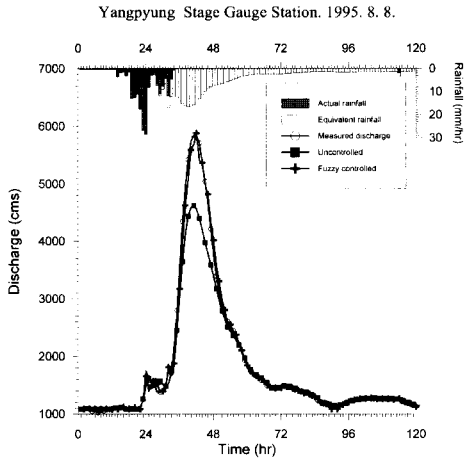
호우사상 \ 오차지표	E_{Op}		E_{Ips} (hr)	
	비제어	퍼지제어	비제어	퍼지제어
1987년 7월 15일	-0.12141	0.01843	0.00000	1.00000
1987년 7월 22일	-0.08734	0.02816	0.00000	0.00000
1987년 8월 4일	-0.09874	0.01000	1.00000	0.00000
1987년 8월 28일	-0.17422	0.01517	1.00000	0.00000
평 균(절대값)	0.12043	0.01794	0.50000	0.25000

호하게 일치하는 결과를 보여준다. 이것은 본 모형의 매개변수에 대한 퍼지제어의 효과가 대단히 크다는 것을 보여주고 있다. 침투발생시간에 대한 위상오차는 예보선행시간이 1시간으로 짧기 때문에 분명하게 나타나지 않고 있다. 전체적으로 볼 때 퍼지제어를 실시한 예측결과가 비제어의 경우에 비하여 관측수문곡선에 잘 일치하고 있으며 이것은 IHP 대표유역과 비슷한 결과로서 본 모형의 강우-유출수문곡선 재현성이 아주 우수함을 보여주는 것이다.

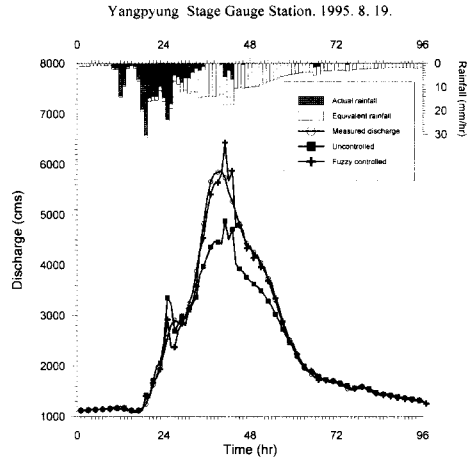
3. 결 론

저류함수모형은 국내 주요하천의 홍수예경보시스템에서 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

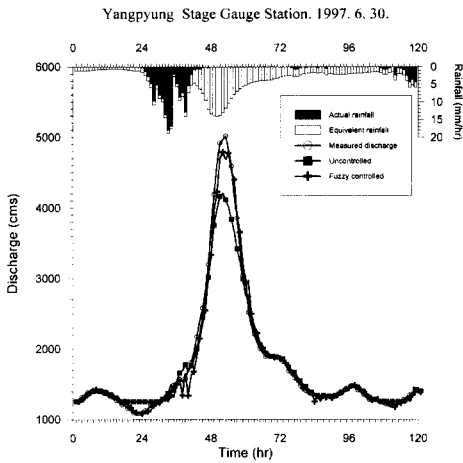
같은 수문학적 강우-유출모형은 복잡한 수문현상을 단순화했기 때문에 사용하기는 쉽지만 모형의 재현성이 떨어진다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 개선하고 홍수예보의 정확성을 높일 수 있도록 유역과 하도주체에 함께 적용할 수 있는 통합저류함수모형(ISFM)을 제안하였다. 본 연구에서는 연구(1)에서 제안된 통합저류함수모형을 실제유역에 적용한 결과를 비교검토하였다. 본 모형은 하도의 상류단 유입량을 등가강우강도로 환산처리 하였으며, 매개변수의 결정에는 최적화기법을 도입하였고, 시변성인 매개변수 K 와 변동유출을 f_2 를 퍼지제어기법을 통해 효과적으로 제어하였다. 본 연구에서 수립한 통합모형의 적용타당성을 검토하기 위하여 IHP 대표시험유역인 위천과 보청천유역 및 남한강과 낙동강유역의 하도구간에 적용한 결과, 퍼지제어를 실시하지 않은 비제어시 수문곡선과 제어시의 수문곡선을 관측홍수 수문곡선과 비교할 때 퍼지제어를 실시한 경우가 훨씬 양호한 결



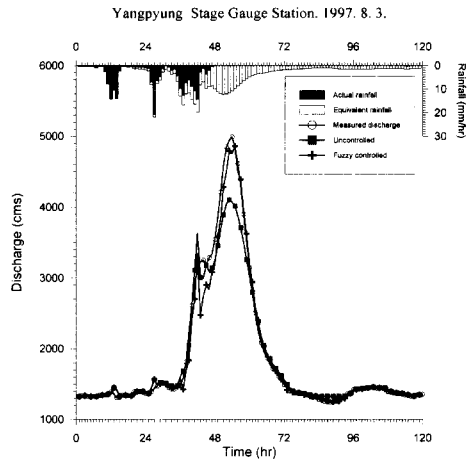
(a) 1995년 8월 8일 홍수추적 결과



(b) 1995년 8월 19일 홍수추적 결과



(c) 1997년 6월 30일 홍수추적 결과



(d) 1997년 8월 3일 홍수추적 결과

그림 4. 남한강 양평 수위관측소 지점의 홍수추적 결과

과를 보여 주었으며, 퍼지제어의 효과는 첨두홍수량의 계산시에는 아주 뚜렷하였으나 첨두발생은 예보선행시간이 길수록 위상오차가 발생하는 문제점이 나타났다. 이 점은 앞으로 개선되어야 할 사항으로 생각된다. 본 연구에서 제안한 통합저류함수모형은 적용 하도구간에서는 홍수유출현상을 성공적으로 재현하고 있지만, 하천수계 전체에 대한 홍수예경보시스템의 강우-유출모형으로 사용하기 위해서는 모형의 정확성을 좀 더 높일 수 있도록 증가강우강도, 예보선행시간, 퍼지제어기법, 축적계수 결정 등에 관한 지속적인 연구가 필요하며,

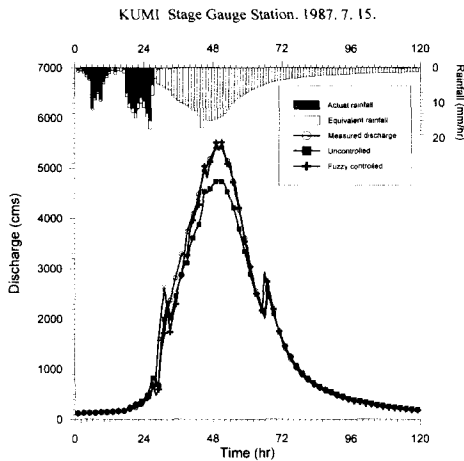
보다 많은 하천유역과 강우사상의 적용에 의한 모형의 보완 및 개선이 필요할 것이다.

감사의 글

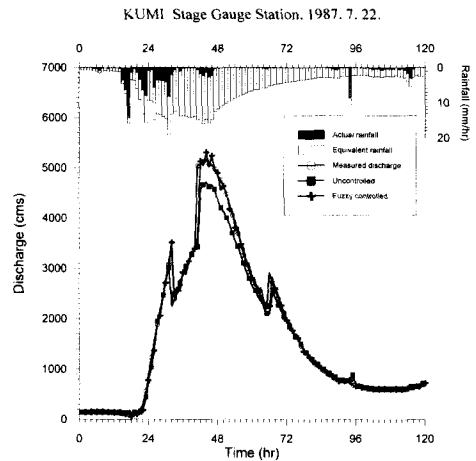
본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: 971-1205-022-2)지원으로 수행된 연구 성과 중 일부입니다. 한국과학재단의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

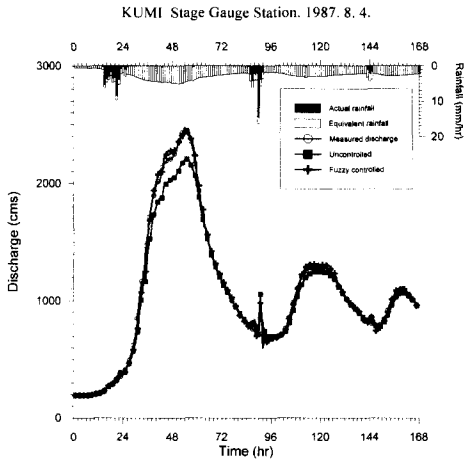
건설부 (1983). 국제수문개발계획(IHP) 대표유역연구



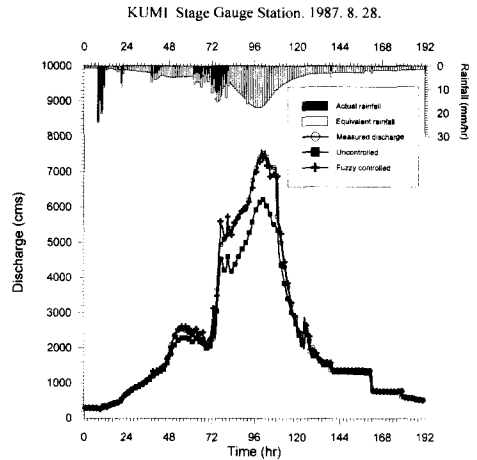
(a) 1987년 7월 15일 홍수추적 결과



(b) 1987년 7월 22일 홍수추적 결과



(c) 1987년 8월 4일 홍수추적 결과



(d) 1987년 8월 28일 홍수추적 결과

그림 5. 낙동강 구미 수위관측소 지점의 홍수추적 결과

조사보고서.

건설부 (1993). 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서.

낙동강홍수통제소 (1997). 낙동강홍수예경보, 건설교통부.

이정규, 김한섭 (2000). “홍수예보를 위한 통합저류 함수의 퍼지제어 (I) - 이론 및 모형의 수립-”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제33권, 제6호, pp. 689~699.

한강홍수통제소 (1997). 한강홍수예경보, 건설교통부.

Yen, B.C. (1981). “Some measures for evaluation and comparison of simulation model,” *2nd International Conference on Urban Storm Drainage*.

(논문번호:00-054/접수:2000.08.14/심사완료:2000.10.30)