

하천 수계의 홍수 예측을 위한 강우-유출 모형의 비교

Comparison of the Rainfall-Runoff Models for Flood Forecasting in Watershed

심 순 보* · 박 노 혁** · 김 선 구*** · 김 주 훈**** · 고 덕 구*****
Shim, Soon Bo · Park, No Hyuk · Kim, Sun Koo · Kim Joo Hun · Koh, Deuk Koo

.....

Abstract

In this study two rainfall-runoff models, the NWS-PC model and the Storage Function Model (SFM), were compared to see their applicability in the flood forecasting at the river system. The SFM has been adopted in the flood-forecasting and warning system for the major rivers in Korea since 1974, and the NWS-PC model, a physically based model, has been developed to simulate soil moisture changing as well as the surface and subsurface flow at the watershed and in the river streams. Case studies were carried out using flood event data observed at the Mihochun watershed in Geum-river basin during 1985 to 1995. Simulated results from both models were compared with the observed data with respect to the RMS errors and relative errors for peak flow discharges and total runoff volumes to show the advantages and disadvantages of both models and to suggest the way to improve their performances.

.....

요 지

본 연구는 하천 수계에서의 홍수 유출 예측 정도를 높일 수 있는 방안을 도출하고자, 저류함수 모형과 NWS-PC모형을 선정하여 모형의 구조 및 특성을 분석하고 그 예측능력을 비교 검토한 것이다. 저류함수 모형은 1974년도부터 우리 나라에 도입되어 주요하천 홍수예경보 업무에 사용되어 왔으며, NWS-PC모형은 유역의 사면과 하도의 유출을 운동파로 모의하고 지표 또는 지하의 수문 과정도 토양함수상태 계산(SAC-SMA)을 통하여 모의하는 물리적 기반의 모형이다. 모형의 적용은 미호천 유역을 선정하였고, '85-95년 동안의 홍수 자료를 이용하여 모형을 적용하고 관측치에 대한 RMS오차와 첨두유량 및 총유출체적의 상대오차 등을 비교한 결과를 토대로 각각의 장단점 및 적용성을 밝히고, 개선방향 등을 제시하였다.

.....

* 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수
 ** 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료/한국수자원공사 수자원연구소 연구원
 *** 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정/수공종합감리공단 사장
 **** 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정
 ***** 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

1. 서 론

하천 수계의 홍수유출을 예측하기 위해서는 시간 및 공간적으로 변동하는 수문 기상 요소와 유역의 특성 인자들에 대한 정확한 상호 관련성의 규명이 필요하다. 유역의 유출 과정은 토지이용과 선행 수문사상 등에 따라 달라지는 매우 복잡한 양상을 띠며, 유역의 강우-유출 관계가 비선형성을 내포하고 있어서 유역 유출의 정확한 예측은 매우 어려운 문제이다.

현재 우리 나라 주요 하천수계에서 홍수예경보 업무에 사용되고 있는 홍수유출모형은 저류함수법에 의한 모형으로서 유역유출 부분과 하도추적 부분으로 구성되어 있다.

저류함수 모형은 1961년 일본의 Kimura(1961)에 의해 개발되어, 일본 하천의 홍수예경보에 실제로 사용되어 왔으며, 우리 나라에서는 1974년도부터 이를 도입하여 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 안성천 유역에 대한 홍수예경보 업무에 적용하여 현재까지 운영 및 보완 작업이 이루어지고 있다.

남궁달(1985)은 저류함수 상수와 유역의 수문인자 및 지형인자와의 관계로부터 저류함수 상수추정식을 구하였다. 건설부 한강홍수통제소(1986)는 홍수예경보 능력의 향상을 위하여 저류함수모형과 HEC-1, SSARR 모형을 비교 평가하는 연구를 수행한 바 있으며, 심순보 등(1992)은 저류함수모형의 매개변수를 자동으로 보정하기 위하여 직접 탐색법의 일종인 Pattern Search법을 이용하여 소양강 다목적댐의 실시간 홍수조절에 적용한 바 있다.

저류함수법은 매개변수의 수가 적고 운영이 간편하지만, 호우 조건이나 토양습윤 및 증발산 등과 같은 수리·수문학적 변화에 따른 반응이 민감하지 못하고, 강우-유출 초기의 유출 산정에 있어서 많은 시행 착오를 거쳐야 하는 등 실용화에 여러 가지 문제점을 내포하고 있으므로 저류함수법을 대신하는 강우-유출모형에 대한 연구가 필요하다.

기 개발되어 입증된 강우-유출모형 중 모형의 구성과 형식 및 적용 목적과 범위 등을 고려할 때 서로 장단점이 있기는 하나, 유출에 영향을 미치는 토양수분상태를 잘 모의하는 모형의 하나로써

Sacramento모형과 운동파이론에 의한 하도추적법으로 구성된 NWS-PC모형을 들 수 있다.

NWS-PC모형은 1973년에 개발된 NWSRFS (U.S. National Weather Service River Forecast System)모형이 발전된 것으로서, 이를 개인용 컴퓨터 프로그램으로 축소시키고, 운동파 추적 프로그램을 조합하여 구성한 프로그램으로 강수, 용설, 토양 함수, 하도 추적 및 매개변수 최적화 등의 요소도 포함하고 있다(Tabios 등, 1986). NWSRFS는 Extended Streamflow Prediction (ESP)기법과 조합되어 미국 Colombia강을 비롯하여, 중국의 후아이강, 수단 Blue Nile강 등의 홍수예보 업무에 전세계적으로 활용되고 있는 모형이기도 하다(Brazil과 Hudlow, 1993).

우리 나라에서는 이상호 등(1995)이 한강 수계의 유역유출체계를 연구하는데 있어서 NWS-PC 모형을 적용하여 강우-유출 연속 모의를 수행한 바 있으며, 배덕효와 조원철(1995)은 Sacramento 토양수분 모형과 비선형 다중저수지 형태의 유역 홍수추적 모형으로 구성된 연속모형으로 홍수 예측 모형으로서의 가능성을 검토하였다. 신용노(1996)는 일유출모형(NWS-PC)의 매개변수 산정 및 적용 연구에서 소양강댐 유역의 홍수유입량 모의에도 적용하였다.

본 연구의 목적은 하천수계에서 홍수유출 예측 정도를 높일 수 있는 방향을 제시하고자, 국내에서 이미 채택하고 있는 저류함수모형과 NWS-PC모형에 대하여 모형의 구조 및 특성을 분석하고, 예측능력을 비교·검토하는 것이다.

2. 강우-유출 모형

2.1 저류함수 모형

저류함수 모형은 확정론적 수문모형으로 분류되며, 유역 유출현상의 비선형성과 물리적 특성을 표현하기 위해 강우-유출의 변환 과정에 유역 저류 과정을 도입하고, 저류량-유출량 관계를 함수식으로 표현함으로써, 저류량의 물수지를 계산한 후 이로부터 유출 수문곡선을 구하는 모형이다. 또한 저류함수법에 의한 유출 계산시 체 계수는 과거의 강

우-유출 자료나 경험 공식으로부터 비교적 용이하게 구할 수 있고, 유역의 수문인자나 지형인자로부터도 산정할 수 있다(남궁달, 1985 : 심순보 등, 1992).

저류함수 모형에서는 홍수유출을 Manning의 경험식을 따르는 지표류라 가정하고, 유역 또는 하도의 구간별 저류량 S_i (m^3)은 식 (1)에 의해 계산하고 있다.

$$S_i = KQ_i^p \quad (1)$$

여기서 K , p 는 각각 유역과 하도의 저류상수이며, Q_i (m^3/sec)은 지체시간 T_i (hr)이 고려된 직접유출을 나타내고 있다.

식 (1)의 운동방정식을 식 (2) 또는 식 (3)의 연속방정식과 조합하여 유역 및 하도의 유출을 산정하게 된다.

$$\frac{1}{3.6} f \bar{r} A - Q_i = \frac{dS_i}{dt} \quad (\text{유역}) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n f_i \cdot I_i - Q_i = \frac{dS_i}{dt} \quad (\text{하도}) \quad (3)$$

여기서 f 및 f_i 는 유역 및 하도에서의 유출계수, \bar{r} 는 유역 평균 시우량(mm/hr), A 는 유역면적(km^2)을 나타내며, I_i 는 하도구간 상류지점에서의 유입량(m^3/sec)을 나타낸다.

식 (1)의 상수 K , p 는 과거 홍수자료로부터 쉽게 구할 수 있으며 매 강우사상에 대해서는 유역 평균강우량 \bar{r} 과 유역유출 과정의 모의를 통해 계산된 하도유입량 I 로부터 식 (1)~(3)에 의해 홍수 유출량 Q (m^3/sec)를 산정할 수 있다. 이외에도 저류함수모형의 운영을 위해서는 강우 초기의 유출률, 즉 1차 유출률로 표현되는 f_1 , 유효강우량 산정에 필요한 포화유출률 f_{∞} 및 포화우량 R_{∞} 에 대한 초기가정이 요구된다(Kimura, 1961).

2.2 NWS-PC 모형

NWS-PC 모형은 크게 토양수분상태 계산모형

과 유역 및 하도의 흐름에 대한 추적모형으로 구성되어 있으며, 확정론적 집중형 매개변수 모형에 속한다.

NWS-PC 모형에서 모의되는 유출 구성은 다음의 다섯 가지로 이루어져 있다.

- (1) 영구적인 또는 일시적인 불투수영역으로부터 유출되는 직접유출(direct runoff)
- (2) 상층부의 자유수 저류지가 포화되거나, 강우강도가 침투 및 중간유출률을 초과할 때 발생하는 지표면유출
- (3) 상층부의 자유수에서 배수되는 중간유출
- (4) 보조지하수
- (5) 기저지하수

처음 3개의 유출 성분은 운동과추적법이나 단위도-Muskingum 방법중 사용자의 선택에 의해 계산되며, 마지막 2개의 성분으로 구성되는 지하유출(subsurface flow)은 토양수분에 대한 선형감쇠 가중함수로 계산한 후 유역 출구에서 합산된다.

2.2.1 강우의 영역 분리

하천 수계내로 떨어진 강우는 투수영역과 불투수영역의 강우로 분리되어 취급된다. 불투수영역의 강우는 다시 영구 불투수영역과 임시 불투수영역의 강우로 나누어지며, 영구 불투수영역은 바위, 지역과 포장된 지표면, 호소, 하천 등이고, 임시 불투수영역은 쉽게 지표면의 토양수분이 포화되어 불투수지역으로 바뀌는 곳으로서 습지나 작은 저류지(small reservoirs), 침출수지역(seepage outflow) 등이다. 반대로 투수영역은 토양내에서 수분상태가 연속적으로 변화하는 지역을 의미한다.

2.2.2 토양수분 상태변화

NWS-PC 모형에서는 토양수분 상태를 연속적으로 모의하는 부모형으로써 Sacramento Soil Moisture Accounting Model(SAC-SMA)이 사용되고 있다. SAC-SMA 모형에서는 유역의 토층을 상층부(upper zone)와 하층부(lower zone)로 구분하고 있다. 상층부는 지표면 근처의 토양층과

차단된 물이 고이는 저류지를 포함하고, 하층부는 심층토양의 토양수분체나 지하수체를 나타낸다. 각 층의 수분은 다시 자유로이 이동할 수 있는 자유수 (free water)와 토양입자에 부착된 부착수 (tension water)로 이루어진다. 그리고 하층부의 지하수도 또한 두 가지로 나누어져서, 장기간의 기저유출에 기여하는 기저자유수(primary free water)와 상대적으로 단기간에 유출되는 보조 자유수(supplemental free water)로서 존재한다.

모형에서 토양수분상태 변화는 먼저 부착수 성분이 채워지고 나서 자유수 성분이 공급되는 것으로 표현된다. 부착수는 증발산에 의해서만 소모 (depletion)되며 자유수는 침투와 증발산에 의해 소모되거나 보충이 이루어 지는 것으로 하고 있다. 상층부에서 하층부로 수분이 이동하는 침투현상은 식 (4)와 같은 상층부 가용수분과 하층부 수분 부족량의 함수로 표현된다.

$$PERC = PERCM(1 + ZPERC \times DEFR^{REXT}) \frac{UZFWC}{UZFWM} \quad (4)$$

여기서 PERC는 침투량, ZPERC와 REXT는 경험식에 의한 침투 매개변수, DEFR은 하층부의 수분 부족비, UZFWC와 UZFWM은 상층부 자유수의 현재 저류량과 저류 용량을 나타낸다.

2.2.3 유역 및 하도추적

NWS-PC 모형은 직접유출, 지표면유출, 중간유출, 보조지하수, 기저지하수의 5개 유출성분을 모의 발생시킨다. 직접유출은 영구 불투수지역에 내린 강우나 임시 불투수지역에서 상층부 부착수가 포화되었을 때 발생하는 유출이며, 지표면유출은 투수지역에서 강우가 상층부의 침투능을 초과하였을 때 발생하는 유출성분이다. 중간유출은 상층부 수분의 횡방향 배수에 의해 발생되며 기저자유수와 하층부 보조자유수는 하층부로 부터의 횡방향 배수에 의해 발생한다.

직접유출, 지표면유출 및 중간유출은 지표흐름 평면(overland flow plane)에 대한 계산과정을 통해 총 하도유입량으로 계산되고, 이 양은 하도추

적을 통해 유역 출구에서의 유출량으로 계산된다. 여기에 지하수 유출성분이 합산되어 유역의 총 유출량이 계산된다.

유역 및 하도에서의 추적은 식 (5) 및 식 (6)과 같은 운동량 방정식과 연속방정식을 연립하여 유한 차분 양해법에 의해 구간별 유출량을 계산하는 것이다.

$$g(S_o - S_f) = V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{V}{y} q \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (6)$$

여기서 Q 는 유량, V 는 유속, A 는 흐름단면적, y 는 수심을 나타내며 x 는 계산구간 내에서의 흐름 방향 거리, q 는 계산구간 내에서 횡유입량을 의미한다. S_o 와 S_f 는 각각 하상의 경사와 에너지 경사를, g 는 중력가속도를 나타낸다.

NWS-PC 모형에서는 경사가 비교적 급한 지역에서의 흐름이 중력과 마찰력에 의해 지배되는 것으로 가정하여 식 (5)의 운동량 방정식에서 관성력과 운동량의 변화 이외의 항을 무시하는 운동과 추적방법(kinematic wave routing method)을 적용하고 있으며, 식 (7)은 운동과 방정식을 나타내고 있다.

$$S_o = S_f \quad (7)$$

3. 모형의 적용

3.1 적용 유역

모형 적용을 위한 대상 유역으로는 금강의 제1 지류인 미호천 유역(그림 1)을 선택하였다. 모형의 시험에 사용된 강우자료는 미호천의 석화지점에서 관측된 '85~'95년 사이의 수문자료중 이용 가능한 7개의 호우사상에 대한 것이다(표 1).

석화 수위관측 지점에 대한 수위-유량관계식은 금강홍수통제소의 자료(금강수계 주요지점 유량 측정 조사 보고서, 1993, 1995)를 이용하였다.

표 4. NWS-PC모형의 매개변수 범위와 초기값 및 보정값

Soil Moisture Phase	Parameter	Description	Range		CASE 1		
			Lower	Upper	step 1	step 2	step 3
Upper Zone	PEADJ	ET-Demand Adjustment Factor	0.7	1.0	0.7	1	1
	UZTWM	Upper zone tension water capacity, mm	5	250	33	40	45
	UZFWM	Upper zone free water capacity, mm	1	70	25	2.3	1.3
	UZK	Daily upper zone free water withdrawal rate	0.03	0.95	0.407	0.407	0.407
	ADIMP	Additional "impervious" area (fraction)	0.0	0.5	0.0065	0.01	0.01
Percolation	ZPERC	(ZPERC+1) × PBASE=the maximum percolation rate	10	130	20	60	20
	REXP	Exponent for the percolation equation	1	3.5	1.0	1.0	0.0
Lower Zone	LZTWM	Lower zone tension water capacity, mm	20	200	50	83	160
	LZFSM	Lower zone supplemental free water capacity, mm	5	350	200	200	250
	LZFFM	Lower zone primary free water capacity, mm	30	900	370	350	350
	LZSK	Daily supplemental withdrawal rate	0.005	0.12	0.113	0.113	0.113
	LZPK	Daily primary withdraw rate	0.003	0.03	0.017	0.035	0.0349
	PFREE	Percent percolated water transferred directly to LZFM storages	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	RSERV	Percent lower zone free water not transferable to LZTW	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Initial Water	UZTWC	Upper zone tension water content, mm	0	250	33	5	5
	UZFWC	Upper zone free water content, mm	0	70	10	10	10
	LZTWC	Lower zone tension water content, mm	0	200	50	20	15
	LZFSC	Lower zone supplemental free water content, mm	0	350	0	0	0
	LZFWC	Lower zone primary free water content, mm	0	900	150	85	15
	ADIMC	Tension water content of the ADIMP area, mm	0	250	0	0.01	0

여기서 Q_{OBS} 는 관측유량, $Q_{CAL}=Q(\Pi, \theta)$ 는 계산 유량을 나타낸다.

Subject to

$$\theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{max} \quad (9)$$

여기서 θ_{min} 과 θ_{max} 는 표 4에서의 같이 각 파라메타의 상·하한선과 같고, Π 는 입력자료, 즉 강우량을 나타낸다.

선정한 호우사상중 홍수 규모가 가장 큰 case 1 (1995년 8월 24일-8월 27일) 수문자료를 이용하여 NWS-PC모형의 매개변수 초기값 산정과 보정을 수행하였다(그림 2(a), 표 4). 선정된 호우사상중 가장 큰 규모의 case 1에 대해 결정된 매개변수는 다른 호우사상에 대한 모형 적용시 매개변수 초기치로 사용되었으며, 저류함수 모형의 적용에서와 마찬가지로 이 값을 기본으로 각 호우사상별 침투유량 및 침투유량 발생시간의 관측치와 모의발생시간의 오차를 최소화하는 방향으로 미세 보정이 이루어졌다.

4. 결과 및 고찰

4.1 홍수유출 모의 발생

선정된 각 호우사상에 대해 저류함수 모형과 NWS-PC 모형을 적용하여 홍수유출을 모의 발생하였다. 저류함수 모형의 경우 각 매개변수는 호우사상에 대해 독립적인 변화양상을 보였으며, 매 모의 발생마다 관측치 수문곡선과의 시각적 비교를 통해 일정 비율을 공급해 주는 과정을 통해 최적 매개변수 조합을 찾아가는 과정을 반복하였다. 각

표 5. 매개변수 조정

매개변수	유역	하도구간
K	1 ~ 1	0.8 ~ 1.1
P	0.8 ~ 4.9	1 ~ 2
T_s	1 ~ 1.9	1 ~ 1.5
f	1 ~ 1.2	-
R_{sa}	0.8 ~ 1	-
기저유량(m ³ /sec)	15 ~ 100	

매개변수의 조정은 표 5에 나타난 바와 같다.

저류함수모형의 적용은 먼저 관측 유량의 초기값과 선행강우 등을 고려하여 기저유량을 추정하고, 기저의 저류함수 계수를 토대로 K , p , T_s 을 조정하면서 관측치와 계산치의 시각적 비교를 통해 유출 용적과 첨두유량의 발생시간, 첨두유량을 일치시키는 방법으로 분석 작업을 수행하였다. NWS-PC 모형은 이미 구한 매개변수 초기값과 보정 결과를 토대로 각 홍수별로 초기 수분상태 변수인 UZTWC, UZFWC, LZTWC, LZFSC, LZFPC

등을 조정면서 관측치와 계산치를 비교하여 유출 용적과 첨두유량의 발생시간, 첨두유량을 일치시켰다. 저류함수 모형과 NWS-PC 모형에 의해 모의 발생된 홍수유출 수문곡선을 관측 수문곡선과 비교한 결과는 그림 3에 나타난 바와 같았다. 이 그림에는 매개변수를 보정하지 않은 저류함수모형에 의한 결과를 함께 제시함으로써 저류함수 모형의 경우 매개변수 보정의 과정이 모형에 의한 예측의 정확성에 미치는 영향이 매우 크다는 사실을 보여 주고자 하였다.

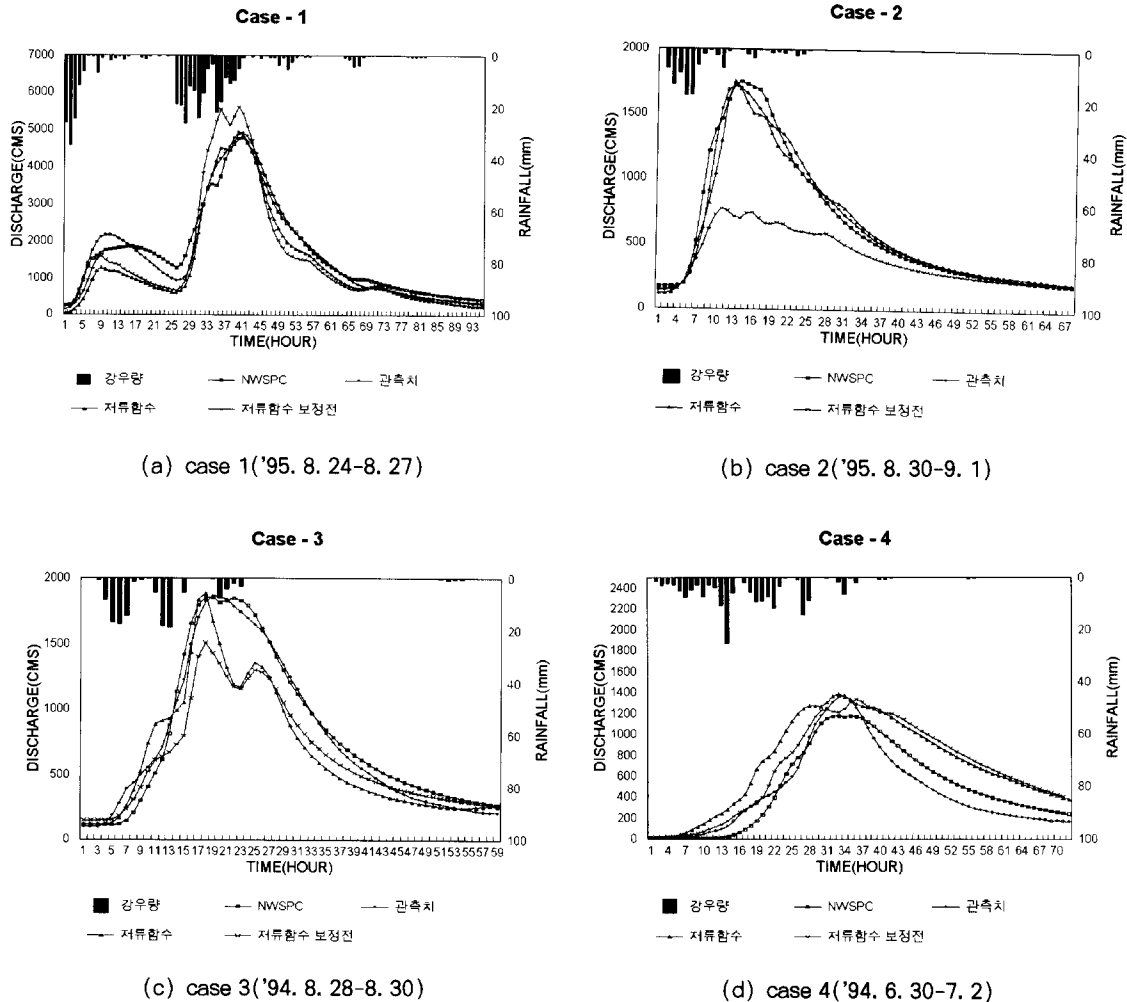
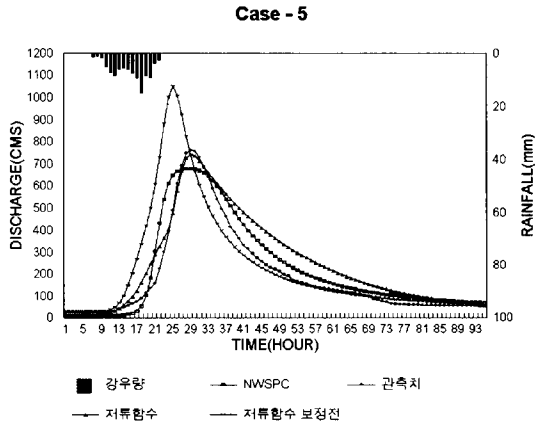
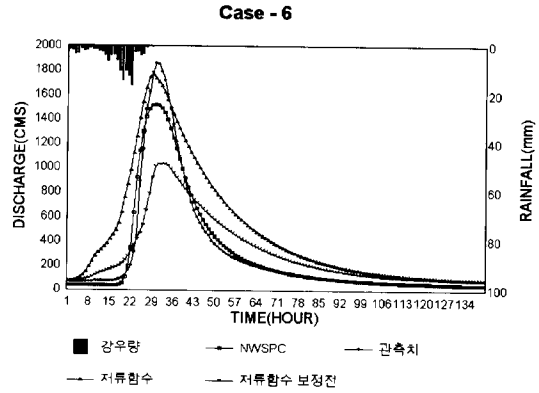


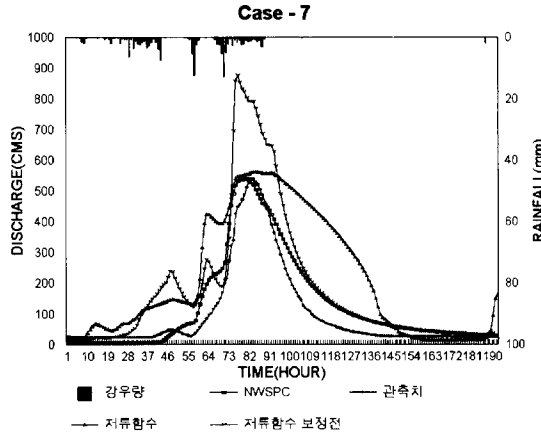
그림 2. 저류함수 모형과 NWS-PC모형에 의한 모의발생 홍수유출수문곡선과 관측곡선의 비교



(e) case 5('92. 9. 24-9. 28)



(f) case 6('92. 8. 24-9. 1)



(g) case 7('85. 8. 14-8. 19)

그림 2. 저류함수 모형과 NWS-PC모형에 의한 모의발생 홍수유출수문곡선과 관측곡선의 비교(계속)

표 6. 강우사상별 관측수문곡선과 모의발생 수문곡선의 RMS 오차

Case Study	RMS Error(m ³ /sec)		
	Storage Function Model		NWS-PC Model
	Before Calibration	After Calibration	
case 1	499.56	411.16	227.63
case 2	392.78	60.99	70.91
case 3	238.95	221.80	90.09
case 4	289.87	307.49	125.53
case 5	151.95	77.86	63.03
case 6	227.53	265.07	88.62
case 7	123.16	167.40	52.37
평균	274.83	215.97	102.60

한편 강우-유출 모형에 의한 모의발생의 정확도를 분석하는 방법으로써 본 연구에서는 관측수문곡선과 모의 발생 수문곡선간의 RMS(Residual Mean Square) 오차를 식 (10)과 같이 계산하였다.

$$S = \left[\frac{\sum(Q_o - Q_e)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (10)$$

여기서 Q_o 와 Q_e 는 각각 관측 유량 및 계산 유량을 나타내며, N 은 관측 시간이다.

표 6에는 각 case마다의 보정 전후의 저류함수

모형에 의한 모의발생 수문곡선과 NWS-PC 모형에 의한 모의발생 수문곡선이 관측 수문곡선에 대해 갖는 RMS오차를 제시하였으며, 표 7은 각 case마다 첨두유량 및 총 유출체적의 실측과 모의 발생치간의 비교 및 그 오차를 나타내고 있다.

표 7. 강우사상별 첨두유량과 총유출체적의 비교

Case Study	Peak Flow(m ³ /sec)			Runoff Volume(10 ⁶ m ³)		
	OBS	SFM	NWS-PC	OBS	SFM	NWS-PC
case 1	4941.80	4918.16 (0.48)	4799.85 (2.87)	162067.06	134982.51 (16.71)	164504.99 (1.50)
case 2	1721.40	1755.19 (1.96)	1752.02 (1.78)	44175.03	42896.12 (2.90)	44192.53 (0.04)
case 3	1864.00	1884.66 (1.11)	1852.45 (0.62)	45832.18	38574.20 (15.84)	47028.43 (2.61)
case 4	1362.00	1383.83 (1.60)	1172.17 (13.94)	32719.20	51604.14 (57.72)	35383.84 (8.14)
case 5	761.64	743.67 (2.36)	679.41 (10.80)	18088.18	23350.66 (29.10)	21037.35 (16.30)
case 6	1857.67	1769.32 (4.76)	1516.72 (18.35)	40860.58	67581.92 (65.40)	40529.95 (0.81)
case 7	538.73	563.19 (4.54)	541.95 (0.60)	18937.40	41317.33(118.18)	24694.65 (30.40)
오차평균 (%)	-	2.40	6.99	-	43.70	8.54

* () : 상대오차 백분율

4.2 홍수유출 수문곡선의 비교

그림 3에서 보는 바와 같이 저류함수모형의 경우 매개변수의 보정 여부에 따라 실측치와의 오차에 많은 차이가 있음을 알 수 있었으며, 실측 수문곡선과의 RMS오차에 있어서도 표 6에서 보는 바와 같이 보정 전 123.16~499.56m³/sec이었던 것이 보정 후 60.99~411.16m³/sec로 평균에 있어서 58.86m³/sec가 낮아진 것으로 나타났다. 이로부터 저류함수모형을 운영함에 있어 매개변수 보정을 위한 고도의 숙달과 경험이 요구되는 것으로 판단할 수 있었다.

최종적으로 보정이 완료된 후 저류함수모형 및 NWS-PC모형에 의해 모의 산정된 수문곡선을 관측치와 비교한 결과를 보면, RMS 오차의 경우 NWS-PC모형에 의한 결과가 52.37~227.63m³/sec로 모든 호우 사상에 대한 평균 RMS오차가 저류함수모형에 의한 결과의 1/2밖에 되지 않는 것으로 나타나 수문곡선의 형상적인 예측능력은 NWS-PC가 비교우위가 있는 것으로 분석되었다.

그러나 모든 강우 사상에 있어서 NWS-PC모형에 의해 모의발생된 수문곡선의 RMS오차가 저류함수모형에 의한 결과보다 양호하게 나타나는 것은 아니어서, 표 6에서 보듯이 case 2의 경우 오히려

저류함수모형에 의한 결과가 양호했던 것으로 나타났다. 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 case 2의 관측 수문곡선 형태는 비교적 단순한 모양을 보이고 있으며, 강우의 양상도 비교적 단순한 분포를 보이고 있는 것을 알 수 있어, 이와 같은 경우 저류함수모형에 의한 예측이 정확히 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 오차의 크기에 있어서는 강우 규모에 비해 두 모형의 결과가 상당히 낮게 나타나 상대적으로 오차의 크기 차이는 미미하다고 볼 수 있었다.

첨두유량의 경우는 저류함수모형에 의한 결과의 상대오차가 0.48~4.76%, 평균은 2.40%인 것으로 나타나, NWS-PC모형의 결과가 나타난 0.60~18.35%, 평균 6.99%보다 우수한 것으로 나타났다. 단일 호우 사상의 첨두유량을 예측하는데 있어서는 저류함수모형이 다소 나은 것으로 판단되었으나 저류함수모형의 결과가 NWS-PC모형의 결과에 비해 많이 우세한 것으로 나타난 case 4, 5, 6의 경우 그림 3(d), (e), (f)에서 보듯이 강우의 시간적 분포와 수문곡선의 형태가 단순한 경우로 국한되었으며, 이 경우 저류함수 모형은 첨두시간 이후 수문곡선의 감쇠부를 잘 모의하지 못하여 총 유출체적에 있어서는 오히려 29.10~65.40%의 상대오차를 보여주고 있었다.

총유출체적의 경우 저류함수모형의 결과가 2.90~118.18%의 커다란 편차를 보이고 있는데 반해, NWS-PC 모형의 경우는 0.04~30.40%의 상대오차를 보이고, 전 호우사상에 대한 상대오차의 평균치도 43.70 : 8.54%의 큰 격차를 보여 NWS-PC 모형의 예측 능력이 비교적 우수한 것으로 분석되었다. 이는 저류함수모형이 속성상 동적으로 변하는 유역의 저류능을 제대로 재현하고 있지 못함대 반해 NWS-PC모형의 경우 토양수분을 연속적으로 계산하여 유출량을 계산하는데 반응할 수 있도록 되어 있는 구조적인 장점을 가지고 있기 때문인 것으로 사료된다.

case 1, case 3, case 7과 같이 강우의 양상이 복잡한 복합강우의 경우에 있어서는 특히 NWS-PC모형의 수문곡선 예측능력이 우세한 것으로 나타났다. 이와 같은 저류함수모형의 약점은 이미 실무자들에 의해서도 거론되어 오고 있는 실정이다.

그러나 NWS-PC모형의 경우, 요구되는 입력 매개변수의 수가 저류함수모형에 비해 훨씬 많고, 각 매개변수의 보정에 세심한 주의를 기울여야 하는 등, 아직은 당장 실무에서 활용되기에 부족한 반면, 저류함수모형은 비상 상황시 간편하게 즉각 적용할 수 있다는 강점과 함께 그 동안 실제 업무에 응용되면서 축적되어 온 경험을 바탕으로 실무자들로부터 여전히 선호되고 있는 실정이다.

장차 NWS-PC모형의 실제 업무에의 적용을 위해서는 매개변수의 고정상수화, 고속의 자동보정 기술, 사용자의 편의성이 고려된 사용자 인터페이스 개발, 초기치의 정확한 산정을 위한 연속 유출모형과의 결합 등 다각적인 연구가 선행되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내에서 기존의 각 하천수계에 대해 홍수예경보 업무를 위해 채택하고 있는 저류함수모형과 그 대안으로서 NWS-PC모형을 선정하여 예측의 정확도를 기준으로 비교 검토하였다. 금강수계의 미호천 유역에서 1985년부터 1995년 사이에 발생한 홍수 중 7개 홍수사상의 수문자료를 선택하여 두 모형에 적용, 홍수 수문곡선을 모의발생시켜 관측수문곡선과 비교 검토를 하였는 바, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) NWS-PC모형은 모든 호우사상에 대한 평균 RMS오차가 저류함수법에 의한 결과의 1/2밖에 되지않는 것으로 보아 수문곡선의 형상적인 예측능력은 NWS-PC가 비교 우위에 있는 것으로 분석되었다.
- (2) 단순 호우사상에 대한 첨두유량의 발생시간과 규모는 저류함수모형에 의한 결과의 상대오차가 0.48~4.76%, 평균은 2.40%인 반면, NWS-PC모형의 결과는 0.60~18.35%, 평균 6.99%로서 저류함수 모형의 결과가 보다 우수한 것으로 나타났다.
- (3) 총유출체적의 경우 저류함수모형의 결과가 커다란 편차를 보이는 반면, NWS-PC 모형의 경우는 작은 상대오차를 보이므로 NWS-PC모형의 예측 능력이 비교적 우수

한 것으로 분석되었다. 이는 저류함수모형의 속성상 동적으로 변하는 유역의 저류능을 제대로 재현하고 있지 못한데 반해 NWS-PC모형의 경우 토양수분을 연속적으로 계산하여 유출량을 계산하는데 반응할 수 있도록 되어 있는 구조적인 장점을 가지고 있기 때문인 것으로 사료된다.

- (4) 연속적인 복합 강우의 경우에는 NWS-PC 모형으로 모의한 결과가 총유출량과 복합 첨두홍수 발생시간 및 홍수수문 곡선의 감소되는 부분의 형태가 실측치와 보다 잘 부합되었다.
- (5) NWS-PC모형의 실제 업무에의 적용을 위해서는 매개변수의 고정상수화, 고속의 자동보정 기술, 사용자의 편의성이 고려된 사용자 인터페이스 개발, 초기치의 정확한 산정을 위한 연속 유출모형과의 결합 등 다각적인 연구가 선행되어야 할 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

- 금강수계 주요지점 유량측정 조사보고서. (1993, 1995). 건설부 금강홍수통제소.
- 금강홍수예경보 프로그램개발 최종 보고서. (1989). 건설부 금강홍수통제소.
- 남궁달 (1985). “저류함수법에 의한 강우-유출모형의 변수추정.” 한국수문학회지, 제18권, 제2호, pp. 175-185.
- 배덕효, 조원철 (1995). “물리적·개념적 연속 유출모형에 의한 유출해석.” 한국수자원학회지, 제28권, 제6호, pp. 193-202.
- 신용노 (1996). “일유출 모형(NWS-PC)의 매개변수 산정 및 적용,” 석사학위논문, 충남대학교.
- 심순보, 김선구, 고석구 (1992). “최적화 기법에 의한 저류함수 유출 모형의 자동보정.” 대한토목학회 논문집, 제12권, 제3호, pp. 127-137.
- 이상호, 김영성, 신용노 (1995). “한강수계 다목적댐 하류 연속유출모형과 동력학적 하도추적 모형 연구 (2차).” 연구보고서, WRRRI-WR-95-2, 한국수자원공사 수자원연구소.
- Brazil, L.E., and Hudlow, M.D. (1980). “Calibration procedures used with the national

- weather service river forecast system." *Water and related land resource systems*, Cleveland, Ohio, pp. 457-466.
- Kimura, T. (1961). "Flood runoff routing by storage function method." *Reference Material for River Engineering Course*, Japan International Cooperation Agency, Ministry of Construction.
- Tabios III, G., Obeysekera, J.T., and Salas, J.D. (1986). *National Weather Service Model: PC Version*, Program and manual assembled by the Hydrology and Water Resources Program, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

〈접수 : 1996년 8월 29일〉