

유역토양수분 추적에 의한 실시간 홍수예측모형

Real-time Flood Forecasting Model Based on the Condition of Soil Moisture in the Watershed

김 태 철* · 박 승 기** · 문 종 필**
Kim, Tai Cheol · Park, Seung Ki · Moon, Jong Pil

Summary

One of the most difficult problem to estimate the flood inflow is how to understand the effective rainfall. The effective rainfall is absolutely influenced by the condition of soil moisture in the watershed just before the storm event. DAWAST model developed to simulate the daily streamflow considering the meteorologic and geographic characteristics in the Korean watersheds was applied to understand the soil moisture and estimate the effective rainfall rather accurately through the daily water balance in the watershed.

From this soil moisture and effective rainfall, concentration time, dimensionless hydrograph, and addition of baseflow, the rainfall-runoff model for flood flow was developed by converting the concept of long-term runoff into short-term runoff.

And, real-time flood forecasting model was also developed to forecast the flood-inflow hydrograph to the river and reservoir, and called RETFLO model.

According to the model verification, RETFLO model can be practically applied to the medium and small river and reservoir to forecast the flood hydrograph with peak discharge, peak time, and volume. Consequently, flood forecasting and warning system in the river and the reservoir can be greatly improved by using personal computer.

I. 서 론

우리나라 농업수리구조물의 계획, 설계 및 관리시에 유효우량과 홍수량을 결정할 때에는 미국 SCS 에서 개발한 Curve number(CN)

에 의한 유효우량과 단위도방법을 적용하기도 한다.

그러나, 우리 유역특성에 적합한 CN가 없을 뿐더러, CN로는 연속적인 유역토양수분변화를 파악할 수 없기 때문에 정확한 유효우량

* 충남대학교 농과대학

** 충남대학교 대학원

키워드 : Curve number, 유역토양수분, 유효우량
홍수유출모형, 실시간 홍수예측

추정은 물론 실시간 홍수량을 예측하는데 큰 어려움이 있다. 실시간 홍수예측은 홍수도달 시간이 3시간 이하인 유역에서는 강우-유출모형에 의한 방법이 9시간 이상인 유역에서는 홍수추적에 의한 방법이 추천되고 있다. 따라서, 중·소하천 또는 큰 저수지의 홍수유입예측을 위해서는 우리 유역에서 관측된 강우-유출자료와 우리 유역특성에 적합한 독자적인 강우-유출모형 개발이 절실하다.

이 연구에서는 평상시에는 김(1991)이 개발한 DAWAST 모형으로 유역토양수분변화를 일별로 추적하고, 호우시에는 추적한 토양수분상태하에서의 시간별 유효우량과 침투량을 추정하는 강우-유출모형을 개발하였다. 이를 기초로 실시간 강우량과 하천수위 또는 저수지수위를 입력하고 유역의 크기에 따라 홍수도달시간을 고려하여 중소유역의 하천 또는 저수지에서의 예상유입 수문곡선을 예측할 수 있는 실시간 홍수예측모형 (RETFLO model)을 개발하였다.

퍼스널 컴퓨터를 이용하여 실시간 홍수를 예측하고 하천 홍수예보 및 저수지 수문관리 등을 할 수 있다면 실무적 차원에서 치수관리 능력이 크게 향상될 것이다. 따라서, 예측한 홍수수문곡선으로 부터 홍수피크량, 홍수도달 시간 및 홍수용량 등을 유역의 홍수도달시간에 따라 보통 1~3시간전에 예측하여 중소하천의 홍수정보 및 저수지 수문조작시에 적용할 수 있을 것이다.

II. 모형의 구성

홍수직전의 유역토양수분을 추적하여 시간별 유효우량을 추정하고 홍수도달시간에 따라 단위도를 합성하고 기저유출량을 더하여 홍수도달시간을 고려한 홍수예측모형을 구성하였다.

1. 홍수직전의 유역토양수분

홍수유출해석에서 가장 어려운 문제가 유효우량 추정이며, 이 유효우량은 유역토양수분의 정확한 이해가 무엇보다 중요하다.

현재의 유역토양수분상태인 유효저류능 S_a 를 SCS의 AMC 1, 2, 3의 단절된 CN로 구하지 않고 Fig. 1의 DAWAST 모형의 불포화토양층의 물수지 분석을 (1)식으로 일별로 연속적으로 유역토양수분상태를 추적하여 홍수직전의 유역토양수분상태를 (2)식으로 파악하므로써 (3)식으로 보다 정확하게 유효우량 추정할 수 있다.

$$WSU_i = WSU_{i-1} + I_i - ET_i - PERC_i \dots\dots (1)$$

$$S_{ai} = U_{max} - WSU_i, U_{max} > WSU_i \dots\dots (2)$$

$$Q_{Si} = (P_i - 0.2S_{ai})^2 / (P_i + 0.8S_{ai}) \dots\dots (3)$$

여기서 i : 일단위(day), S_a : 유효저류능(mm), Q_s : 유효우량(mm) U_{max} : 최대 유역토양수분량(mm), WSU : 현재 유역토양수분량(mm)

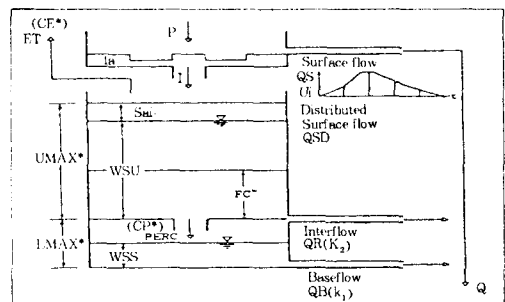


Fig. 1. Structure of DAWAST model

2. 시간별 유효우량

관측된 Hyeto-hydrograph로 부터 관측 유효우량을 산정한다. 수문곡선에서 유효우량을 분리하는 방법은 여러가지가 있으나, 어느 방

법을 적용하거나 모든 유역과 모든 홍수사상에 일관되게 적용하여야 한다.

이 연구에서는 유역면적이 2.5~250km²인 중규모 유역의 경우에는 대체로 T_b/T_p가 5 범위에 있다는 경험을 고려하여 유출시점과 마지막 강우시간으로부터 5×t_p 되는 시점까지를 직선으로 연결하여 윗 부분은 직접유출, 아래부분은 기저유출로 분리하여 시간별 유효우량을 산정하였다.(J. D. Hewlett, 1977) 또한, 실시간 홍수예측에 이 기저유출량을 적용하기 위하여 기저유출 분리직선의 기울기를 구하였다.

DAWAST 모형으로 파악된 홍수직전의 유역토양수분상태에 시간단위를 1시간으로 취하여 시간별 유효우량을 추정한다.

호우가 발생하면 (2)식의 S_{ai}를 (4)식 S_{at}에 대입하여 처음 단위시간 강우량 P_i로 부터 처음 시간의 유효우량 Q_{St}를 구하고, 그 다음 시간의 유효우량은 다음 시간의 강우량 P_i와 전 시간의 유효저류능 S_{at-1}에 (5)식으로 구한 단위시간의 침투량을 뺀 (6)식으로 구한 다음 시간의 유효저류능 S_{at} 값을 (4)식에 대입하여 구한다. 이와같이 시간별로 불포화층의 유효저류량 S_a를 연속적으로 추적하여 시간별 유효우량을 구한다.

$$Q_{St} = (P_i - 0.2S_{at})^2 / (P_i + 0.8S_{at}) \dots\dots (4)$$

$$I_t = P_i - Q_{St} \dots\dots (5)$$

$$S_{at} = S_{at-1} - I_t \dots\dots (6)$$

여기서, t는 시간단위(hrs)

3. 홍수도달시간

홍수도달시간은 유역의 물리적 특성과 유효우량과의 관계로 정의되며 유속에 의한 방법, 유역의 물리적 특성에 의한 방법, 지체시간에 의한 방법 등이 있다. 이 연구에서 적용한 SCS TR-55 방법은 하천흐름을 지표면류, 중

간류와 하천류의 단계별로 구한 도달시간의 합으로 구한다.

가. 지표면류

지표면류의 유속은 (7)식으로 구한다.

$$T_c = 0.0288 \times (n \times L)^{0.8} / (P_2^{0.5} \times S^{0.4}) \quad (7)$$

여기서, T_c: 도달시간(hrs), L: 하천장(m), n: Manning 계수, P₂: 평균 일강수량(cm), S: 유역경사(m/m)

나. 중간류

유역경사가 6% 이상이면 중간류로서 유역경사와 지표면 상태에 따라 SCS TR-55에서 제시한 평균유속을 취하여 도달시간을 계산한다.

다. 하천류

유역면적이 8또는 16km² 이하이고, 유역경사가 6% 이하인 소하천류의 경우에는 CN가 50~95 범위안에서 (8)식의 CN 방법으로 구한다.

유역면적이 16km² 이상인 대하천류의 경우에는 Manning등 유속공식으로 도달시간을 추정한다.

$$T_{lag} = L^{0.8} (S_a + 1)^{0.7} / 1,900 Y^{0.5} \dots\dots (8)$$

$$T_{lag} = 0.6 \times t_c \dots\dots (9)$$

여기서, L: 하천연장(ft), S_a: 유효저류량(in), Y: 유역경사(%), T_{lag}: 지체시간(hrs)

4. 단위도 합성

유역토양수분을 고려하여 홍수직전의 유효우량을 추정하고, 시간별 유효우량에 의한 유출형태를 삼각단위도 또는 SCS 무차원단위도로 가정하고 기본요소인 T_p와 Q_p를 경험식으로 구하여 홍수수문곡선을 합성한다.

면적이 2.5~250km²인 중규모 유역의 경우에는 대체로 T_b/T_p가 5 범위에 있어 대체로

SCS 무차원단위도로 홍수수문곡선을 합성하게 된다.

유역면적이 큰 경우에는 주하천도 유역경사가 뚜렷이 다른 소유역으로 분할하고, 강우강도가 다른 것을 강우관측망의 지배면적으로 고려하여 혼합유역 홍수수문곡선을 합성, 예측한다.

$$T_p = D/2 + T_{lag} \text{ 또는 } T_{lag} = 0.6T_c \dots\dots (10)$$

$$T_b = 2.67T_p \dots\dots\dots (11)$$

$$Q_p = 0.2082 \times A \times Q_s / T_p \dots\dots\dots (12)$$

여기서, T_p : 피크시간(hr), D : 단위시간(hr), T_b : 기저시간(hr), A : 유역면적(km²), Q_s : 유효우량(mm), Q_p : 피크홍수량(m³/sec)

5. 홍수예측모형의 구성

홍수직전의 유역토양수분을 DAWAST 모형으로 추적하여 시간별 유효우량을 추정하고 홍수도달시간에 따라 단위도를 합성하고 기저유출량을 고려하여 중소유역에서 1~3시간전에 유입량을 예측하는 홍수예측모형(REAL

Time FLOOD : RETFLO model)을 구성하였다.

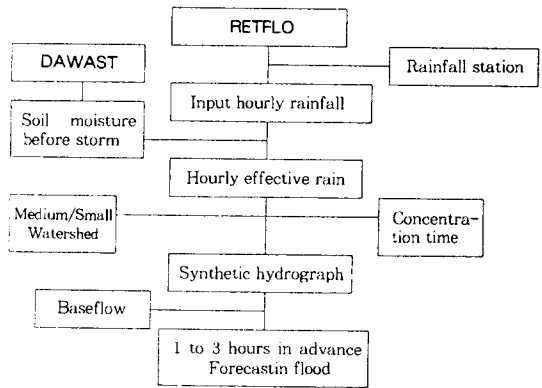


Fig. 2. Schematic description of real-time flood forecasting model

III. 적용 유역과 수문자료

모형적용을 위하여 충남 예산군에 위치한 예당지에서 1992년 8월 26일~28일과 1989년 9월14일~15일에 발생한 홍수관측자료를 사용하였다.

Table-2. Parameters applied to the DAWAST model

Item	Parameters for water balance					Parameters for routing				
	U _{max}	L _{max}	FC	CP	CE	U ₁	U ₂	U ₃	k ₁	k ₂
Value	320	30	130	0.020	0.007	0.52	0.37	0.11	from eq.	

1. 유역특성

예당지는 Fig.3과 같이 유역면적이 크고 홍수도달시간이 길어 홍수예측에 의한 합리적인 수문조작이 절실하게 요구되어 모형적용에 적합한 저수지이다.

차령산맥이 해발 500m의 산지지형을 형성하고, 무한천 본류와 예당지에서 합류하는 신양천, 화산천이 있고, 미사사양질 또는 사양질의 충적토가 분포되어 있으며 배수가 양호한

암쇄토 지역을 형성하고있다.

2. 수문자료

가. 모형 보정

모형 보정에는 예당지에서 1992년 8.26~28일에 발생한 홍수관측자료를 사용하였으며 호우의 시간별 강수량, 유입량, 방류량 및 저수위 변화를 나타내면 Fig. 4와 같다. 상류 7개 강우관측소에서 관측하였으며 181.3~263.

5mm가 내렸으며, 시간별 저수위, 저수량 증가량과 수분방류량을 고려하여 홍수유입량을 계산하였다. 유역평균 210.9mm의 강수량에 의한 총유입량은 약 52,990,000m³로 이 가운데 36,720,000m³를 수문으로 방류하였고 16,270,000m³는 저수지에 저류되어 저수위가 El. +20.33m에서 El. +22.07m로 상승하였다. 최대유입량은 8월 27일 13:30에 1,386m³/sec로 이때 저수위는 홍수조절수위선인 El. +21.63m이었으며, 17:00에 최대방류량은 833m³/sec으로 약 40%의 홍수조절효과가 있었다. Fig. 4에서 유효강우중심(10:00)에서 피크시간(13:30)까지의 지체시간은 3.5시간이므로 홍수도달시간은 약 6시간이었다.



Fig. 3. Watershed map of Yedang reservoir

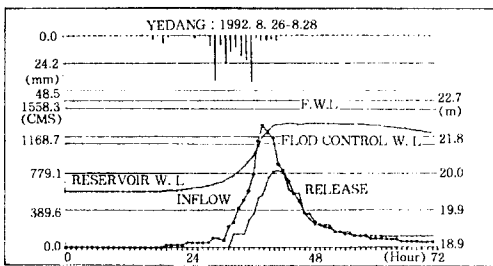


Fig. 4. Rainfall, waterlevel and discharge of inflow and release

나. 모형 검정

보정된 매개변수로 모형의 일반적인 적용성을 검정하기 위하여 예당지에서 1989년 9.14~15일에 발생한 홍수관측자료를 사용하였으며, 시간별 저수위변화로 부터 저수량 증가량과 수분방류량을 고려하여 홍수유입량을 계산하였다. 유역평균 191.6mm가 내려 약 43,813,000m³이 유입하였으며 이 가운데 39,782,000m³를 수문으로 방류하였고 나머지 4,028,000m³는 저수지에 저류되어 저수위가 El. +21.44m에서 El. +21.85m로 상승하였다. 지체시간은 4시간으로 홍수도달시간은 약 6~7시간으로 관측되었다.

IV. 모형적용의 결과 및 고찰

1. 모형의 보정

가. 홍수직전의 유역토양수분

유입량은 당진, 예산, 청양의 Thiessen 망으로 구한 유역 일 강우량과 예당지 상류 대홍지점의 1964~66년 유출량 자료로 부터 DAWAST 모형의 매개변수를 결정한 결과는 Table-2와 같고, 이로부터 추정한 유역의 수문반응과 일 유출량은 Fig. 5과 같다.

나. 시간별 유효우량

DAWAST 모형의 시간단위를 1시간으로 취하여 누가강우량으로부터 누가유효우량과 시간별 유효우량을 구하였다.

DAWAST 모형으로 부터 일별로 추적해온 1992년 8월25일 홍수직전의 유역토양수분량은 140mm로서 S_a값은 180mm이다. 이 값은 유역토양수분이 보통의 수분상태로 약 60.3%의 직접유출률을 보이고 있으나 실측한 유효

Table-2. Parameters applied to the DAWAST model

Item	Parameters for water balance					Parameters for routing				
	U _{max}	L _{max}	FC	CP	CE	U ₁	U ₂	U ₃	k ₁	k ₂
Value	320	30	130	0.020	0.007	0.52	0.37	0.11	from eq.	

우량 117.5mm와 약 8.3%의 오차를 보이고 있다. 홍수직전 기저유량은 $23.3\text{m}^3/\text{sec}$ (=0.224mm/hr)이었으며 실시간 홍수예측에 적용하기 위한 기저유출 직선기울기는 $0.0064\text{m}^3/\text{sec}/\text{hr}/\text{km}^2$ 이다.

다. 홍수도달시간

하천장과 강우관측망을 고려하여 SCS의 표면류, 중간류과 하천류 공식으로 소유역 지점별로 계산하였다. 분할된 각 소유역의 유하시간을 Table-3과 같이 Manning 유속공식으로 계산하였으며 최상부 백월산에서 해당지까지의 30.3km 구간의 홍수도달시간은 약 6시간으로 관리자의 관측치와 거의 일치하였다.

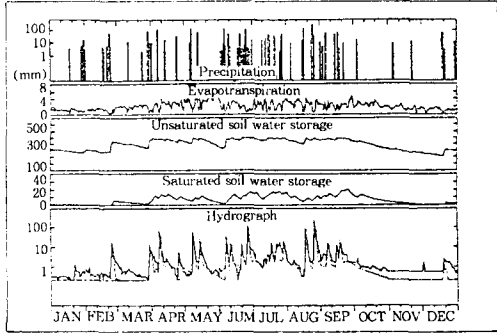


Fig. 5. Storage of water in the unsaturated soil simulated by DAWAST model

Table-3. Travel time in minutes along the sub-watersheds

Item	Channel length km	Roughness coeff. n	Slope m/m	Hydrau. radius R	Discharge m^3/sec	Velocity m/sec	Travel time t_t Minutes
Mt.Bakwol~WS	10.1					1.23	133
WS~BB	6.6	.035	.0024	1.520	366	1.85	60
BB~KS	8.2	.028	.0008	1.510	563	1.33	103
Sub total	24.9						296
Mt.Kuksa~UK	9.3					1.44	105
UK~SY	4.4	.038	.0027	1.393	234	1.71	43
SY~DH	6.3	.030	.0010	1.450	646	1.35	78
Sub total	20.0						226
Mt.Bongsu~DS	11.4					1.39	137
DS~SY	4.1	.035	.0019	1.500	304	1.62	42
SY~DH	6.3	.030	.0010	1.450	646	1.35	78
Sub total	21.8						257
Yedang	5.4					1.35	66
Total	30.3						362

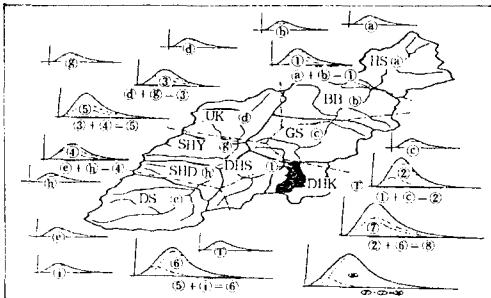


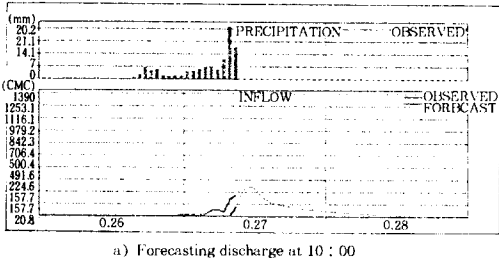
Fig. 6. Hydrographs and routings along the sub-watersheds

라. 소유역 분할 및 단위도 합성·추적
유역형태와 경사를 고려함과 동시에 강우측정망의 지배면적을 고려하여 9개 소유역으로 분할하여 Fig. 6과 같은 방법의 홍수수문곡선을 해당지에 적용하여 합성, 추적한다.

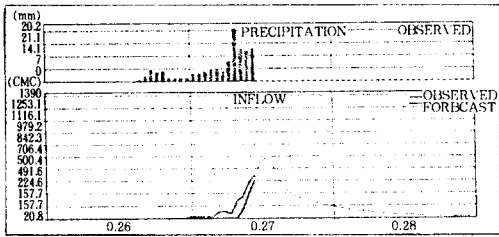
마. 실시간 홍수예측 수문곡선

'92년 8월 26일~28일 발생한 호우를 시간별로 입력하여 1시간전에 예상되는 홍수량을 예측한 결과를 Fig. 7. a)~f)에 2시간 간격으로

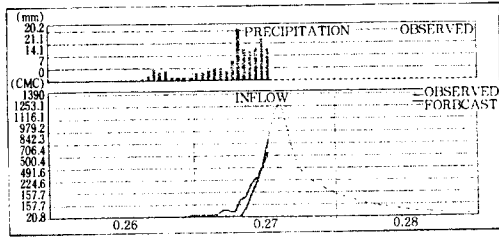
로 제시하였으며, 이를 1시간후에 관측한 홍수량과 비교한 결과는 Table-4와 같다. 식 (13)으로 구한 상대오차는 피크홍수량의 경우 약 8.6%, 홍수량의 경우 약 0.5%이며, 피크시간은 약 1시간 지체되어 나타났다.



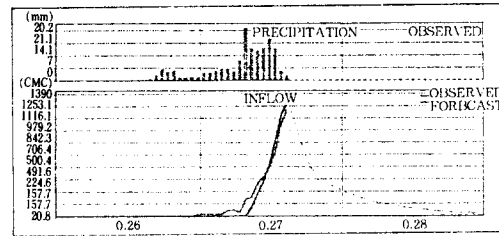
a) Forecasting discharge at 10 : 00



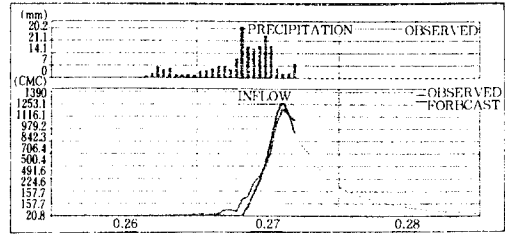
b) Forecasting discharge at 12 : 00



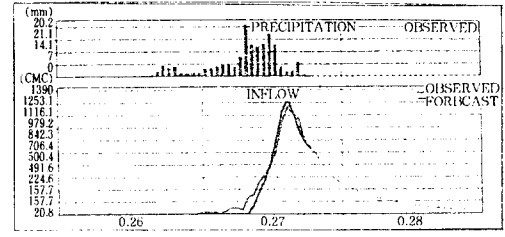
c) Forecasting discharge at 14 : 00



d) Forecasting discharge at 16 : 00



e) Forecasting discharge at 18 : 00



f) Forecasting discharge at 20 : 00

Fig. 7. Forecast flood inflow for the calibration event of 1992 Aug-26 to 28

$$R.E(\%) = 1/n \times \sum |Q_f - Q_o| / Q_o \times 100 \quad \dots \dots \dots (13)$$

여기서, Q_f : 예측홍수량, Q_o : 관측홍수량,
 n : 자료수

앞으로 실시간 홍수량예측의 경우 유효우량과 홍수도달시간을 추정하여 SCS 무차원단위

Table-4. Forecast and Observed hydrograph and for the calibration event

Hour	Forecast m ³ /sec	Observed m ³ /sec	Rem
22	23.3	23.3	
23	23.3	46.6	
24	23.3	46.6	
27 1	23.3	46.9	
2	23.3	46.9	
3	23.3	47.2	
4	23.3	94.7	
5	23.3	95.3	
6	23.3	71.7	
7	23.3	217.2	
8	26.0	269.2	
9	127.5	410.0	

Hour	Forecast	Observed	Rem
	m ³ /sec		
10	284.6	491.1	peak
11	428.7	596.1	
12	633.3	770.0	
13	909.7	1,191.1	
14	1,244.3	1,280.6	
15	1,390.2	1,227.2	
16	1,226.0	1,195.0	
17	1,010.0	890.0	
18	877.8	817.2	
19	797.6	696.7	
20	724.0	566.1	
21	613.3	480.3	
22	514.5	357.8	
23	443.8	355.6	
24	398.2	265.5	
28 1	360.7	238.6	
2	327.0	210.8	
3	296.6	210.0	
4	269.3	166.9	
5	244.7	166.9	
6	222.5	138.3	
7	202.6	138.3	
8	184.6	119.2	
9	154.0	119.2	
10	140.9	119.2	
Total	14,285.4	14,213.3	

도에 따라 추정된 홍수수문곡선과 관측한 홍수 수문곡선의 피크와 용량이 허용오차내에 있도록 S_a를 시간별로 parameter updating 하면 보다 정확하게 홍수량을 예측할 수 있을 것이다.

2. 모형의 검증

보정된 모형의 매개변수를 적용하여 '89년 9월 14일~15일 발생한 호우를 시간별로 입력하여 1시간후 예상되는 홍수량을 예측하고, 이를 1시간후에 관측한 홍수량과를 비교하여 검증한 결과는 각각 Fig. 8, Table-5와 같고, 상대오차는 피크홍수량의 경우 약 6.9%, 홍수 용량의 경우 약 0.1%이며, 피크시간은 약 2 시간 지체되어 나타나고 있다.

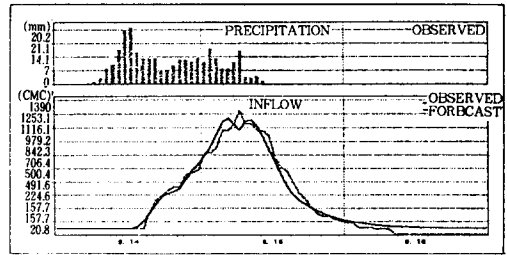


Fig. 8. Forecast by RETFLO model and observed flood inflow for the verification event

Table-5. Forecast and Observed flood hydrograph for the verification event

Hour	Forecast	Observed	Rem	Hour	Forecast	Observed	Rem
	m ³ /sec				m ³ /sec		
14 13	80.5	80.5	peak	15 1	410.8	421.4	
14	88.4	80.5		2	449.6	421.4	
15	113.1	80.5		3	504.8	443.9	
16	149.3	152.5		4	560.7	522.8	
17	189.8	208.0		5	576.4	523.9	
18	225.9	230.7		6	549.2	552.5	
19	240.4	251.3		7	523.7	610.8	
20	247.9	270.5		8	563.7	551.7	
21	263.6	271.1		9	568.5	551.7	
22	306.9	327.5		10	541.1	522.5	
23	348.8	334.1		11	492.4	522.5	
24	374.3	346.7		12	435.8	499.3	

Hour	Forecast	Observed	Rem	Hour	Forecast	Observed	Rem
	m ³ /sec				m ³ /sec		
13	382.8	401.1		16 1	115.1	106.9	
14	323.9	356.4		2	109.8	106.7	
15	269.0	338.6		3	105.4	84.2	
16	232.9	287.2		4	101.6	84.2	
17	208.9	240.0		5	98.3	84.2	
18	189.5	211.4		6	95.5	78.6	
19	173.1	172.8		7	93.2	78.6	
20	159.1	144.7		8	91.3	78.6	
21	147.2	135.0		9	89.6	55.8	
22	137.2	135.0		10	88.1	55.8	
23	128.6	120.8					
24	121.3	115.8		Total	12267.0	12250.7	

IV. 결 론

DAWAST 모형으로 유역토양수분변화를 일별로 추적하므로서 호우가 예상되면 파악된 유역토양수분량으로 부터 보다 정확하게 시간 별 유효우량을 추정할 수 있다.

이 추정된 유효우량에 홍수도달시간, SCS 무차원단위도 및 기저유출량을 적용하여 홍수 유출모형을 개발하였다.

이 홍수유출모형을 기초로 실시간 강우량과 하천수위 및 저수지수위를 입력하고 홍수도달 시간을 고려하여 중소유역의 하천 또는 저수 지에로의 홍수유입 수문곡선을 예측할 수 있는 실시간 홍수예측모형(RETFLO model)을 개발하였다.

RETFLO 모형의 검정 결과 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 실용적인 측면에서 대체로 만족스러운 홍수예측이 가능하였으며, 중소하천의 홍수경보 및 저수지 수문조작시에 홍수피크량, 홍수도달시간 및 홍수용량 등을 유역의 홍수도달시간에 따라 보통 1~3시간전에 예측할 수 있을 것이다.

이 논문은 1992년 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 농림수산부, 1994, 저수지 치수관리에 관한 연구, 충남대학교 농업과학연구소
2. 권순국, 고덕구, 1988, 산지 소유역의 홍수 유출예측을 위한 모의발생 수문모형의 개발, 30(3), pp.58-68.
3. 김태철, 노재경, 박승기 1991, 유역토양수분 추적에 의한 유출모형, 한국농공학회지 33(4), pp.61-72
4. 박창언, 박승우, 1994, 영산호 운영을 위한 홍수예보모형의 개발(I), 한국농공학회지 36(4), pp.95-102.
5. 이순혁, 1991, 장단기유출 양용 저류탱크모델의 개발에 관한 연구(I), (II), 한국농공학회지 33-1,2,
6. Scott A. Brown, et al, 1985, A microcomputer based real-time flood warning system, Hydraulics and hydrology in the small computer age, Vol 2, ASCE Proceeding
7. G. Fleming, 1986, Case studies on realtime river flow forecasting, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 329-366
8. 角屋 睦, 1987, 장단기유출 공용 Model과 댐유입량 예측의 응용, 한국농공학회지 29-3, 59-74

(접수일자 : 1995년 7월 18일)