

# 최적화기법에 의한 관개저수지의 실시간 홍수예측모형

## Real-time Flood Forecasting Model for Irrigation Reservoir Using Simplex Method

문        종        필\* · 김        태        철\*\*  
Moon, Jong    Pil · Kim,    Tai    Cheol

### Abstract

The basic concept of the model is to minimize the error range between forecasted flood inflow and actual flood inflow, and forecast accurately the flood discharge some hours in advance depending on the concentration time( $T_c$ ) and soil moisture retention storage( $S_a$ ).

Simplex method that is a multi-level optimization technique was used to search for the determination of the best parameters of RETFLO (REal-Time FLOod forecasting) model. The flood forecasting model developed was applied to several storm event of Yedang reservoir during past 10 years. Model performance was very good with relative errors of 10% for comparison of total runoff volume and with one hour delayed peak time.

### I. 서        론

최근 이상기후에 의한 집중호우로 홍수피해는 날로 심각해지고 있다. 홍수발생에 대비한 방재업무와 홍수시 수자원을 효율적으로 관리하기 위해 보다 정확한 홍수량 예측업무가 절실하게 되었다.

이수를 목적으로 운영되는 관개저수지는 대부분 유입하천이 중·소하천<sup>2)</sup>이므로 예지시간이 짧고 홍수조절용량도 적어서 홍수조절에 부담이 크다. 또한 홍수조절에 대한 실패는 곧바로 용수공급량의 부족으로 이어질 수 있다. 그러므로 보다 적극적으로 용수를 확보하고 홍수피해를 최소화하기 위해서는 강우-유출의 상관관계에 의한 복잡한 유역반응을 단순화하고 개념화<sup>5)</sup>하여 신속하고 정확

하게 홍수유입량을 예측하여, 홍수조절을 위한 댐수문의 효율적 조작과 지역주민 및 유관기관에 홍수정보를 제공<sup>4)</sup>하여 홍수피해를 최소화하여야 한다.

이 연구의 목적은 퍼스컴을 이용하여 행정자치부의 방재시스템에서 강우와 수위자료를 Off-line이 아닌 On-line으로 전송받아 Kalman filter 기법<sup>7,10,12)</sup>의 기본개념에 입각한 Simplex method에 의하여 실시간으로 자동매개변수를 추정하고 SCS 합성단위유량도<sup>1)</sup>를 적용함으로써 정확하고, 신속하게 실시간 홍수유입량을 예측하는 Black box형 홍수예측모형<sup>8,9)</sup>을 개발하여 보다 효율적인 홍수예·경보 체계를 구축하는데 있다.

\*충남대학교 대학원

\*\*충남대학교 농과대학

키워드 : 홍수도달시간, 유역토양수분상태  
Simplex method

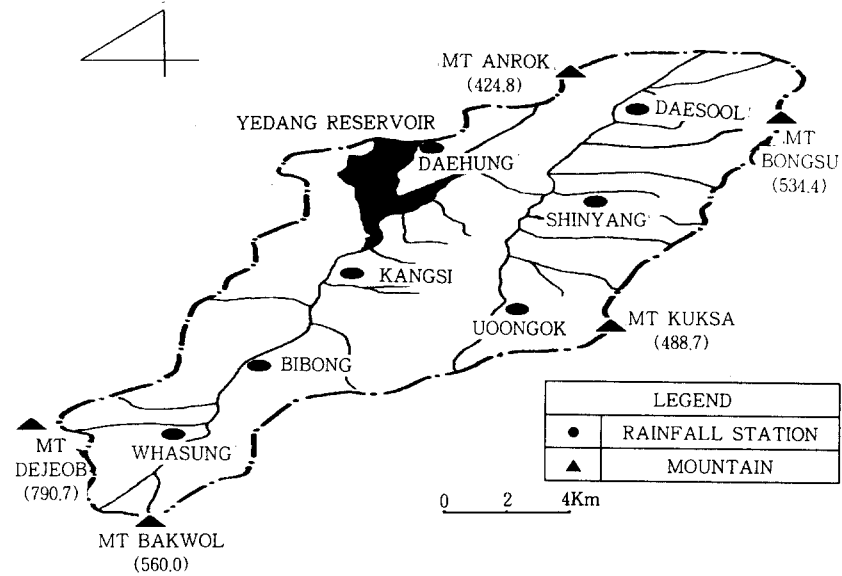


Fig. 1 Watershed map of Yedang reservoir

## II. 대상유역 및 적용자료

### 1. 대상유역

실시간 홍수예측모형을 적용하기 위하여 충남 예산군에 위치한 관개저수지가 있는 예당지 유역을 선정하였다.

예당지는 관개저수지로 유역면적이 373km<sup>2</sup>, 관개면적 8,788ha로 비교적 크고 홍수도달시간이 길고 실시간 홍수예측에 의한 홍수 예·경보 및 수문조작이 절실하게 요구되는 바, 적용대상유역으로 선정하였다.

예당지 유역에서 과거 10년동안에 발생했던 1989년 9월14일~15일, 1992년 8월 26일~28일, 1995년 8월 23일~26일의 3가지 호우사상에 대한 홍수관측자료를 모형의 보정자료로서 적용하였으며 1999년 8월 2일~4일 예당지 유역에 발생한 호우사상을 모형의 검정자료로 사용하였다.

### 2. 기상자료

예당지 유역내에는 1996년 이후 청양군, 비봉면, 화성면, 운곡면 및 예산군, 대술면, 광시면, 대흥면 등 7개 면사무소에 자기강우계로 강수량을 관측하고 있다. 관측자료는 On-line으로 행자부 방재망으로 자동 전송된다. 이 연구에서는 전송되는 자료를 실시간으로 전송받아 Thiessen 법으로 유역평균강수량을 산정하여 적용하였다.

### 3. 수문자료

모형 적용을 위하여 홍수발생시 홍수에 대비한 저수지 유입량과 저수위, 이에 따른 방류량 자료 등을 분석하였다. 또한 홍수조절을 수행한 실적이므로 분석상 매우 의미가 있으며 실시간 홍수예측 모형개발을 위한 보정 및 검정의 기초자료로서 사용하였다.

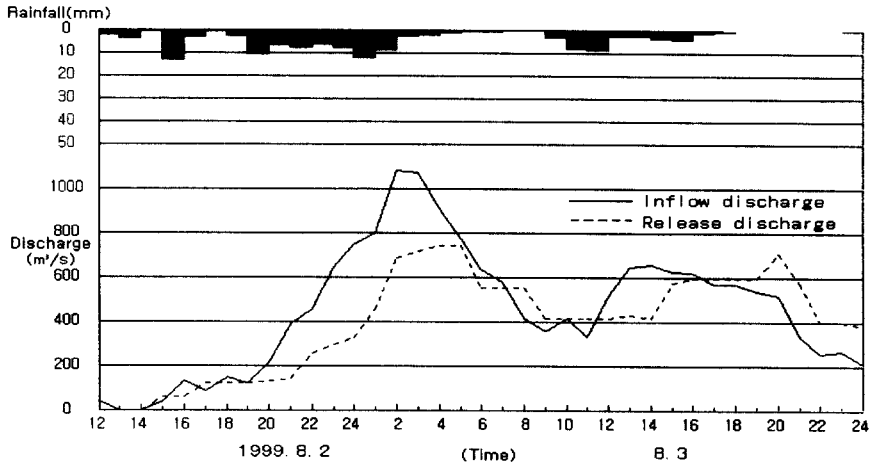


Fig. 2 Hourly rainfall, inflow, release curve at Yedang reservoir from August 2 to 3 in 1999

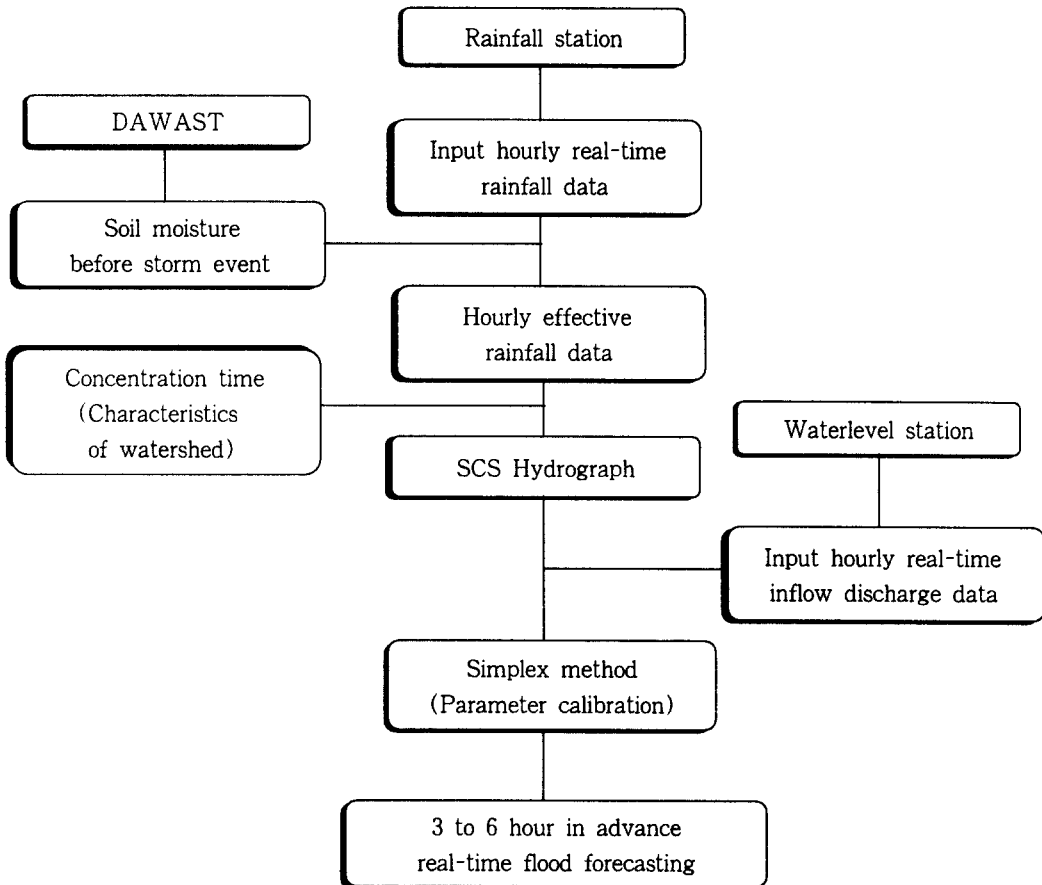


Fig. 3 System of real-time flood forecasting model

### Ⅲ. 모형의 개발

#### 1. 모형의 기본개념

이 실시간 홍수예측모형은 Fig. 3과 같이 강수량, 하천수위, 저수위자료가 On-line으로 실시간 입력<sup>4)</sup>되기 때문에 자료가 매시간 새롭게 변화한다. 그러므로 시간에 따른 자료변화에 적응할 수 있도록 순환적으로 각 시간단계마다 계산하고 동시에 최적의 매개변수를 추정할 수 있는 Kalman Filter개념을 Simplex method에 도입하였다. 토양수분상태를 연속적으로 추정할 수 있는 DAWAST 모형<sup>3,5)</sup>으로부터 호우직전의 유역토양수분상태  $Sa^3)$ 를 산정하고 USBR(미개척국)식으로 홍수도달시간의 초기값을 산정하였다. 산정된 두개의 매개변수를 이용하여 SCS 합성단위유량도를 작성하고 홍수유입량을 추정하였다. 이 때 추정된 값이 실측치에 근접하지 못한 경우 실측치를 가장 잘 재현하는 매개변수를 Simplex method로 탐색하여 updating하고 feed-back 하므로써 관측자료가 부족하고 관측수문자료가 전무한 중·소 하천 및 저수지에서도 비교적 정확하게 홍수유입량을 예측할 수 있는 실시간 홍수예측(Real Time Flood forecasting: RETFLO)모형을 개발하였다.

#### 2. 모형의 보정방법

실시간 홍수예측(RETFLO)모형의 보정에는 2개의 매개변수( $Sa, Tc$ )에 대한 예민도분석을 실시하였고 최적화기법으로 최적의 매개변수 조합<sup>11)</sup>을 선택하였다. 보정방법은 Kalman Filter기법의 기본개념을 도입하여 매시간 변화하는 자료에 대한 오차를 수정할 수 있도록 제약조건이 없는 비선형 Simplex method를 순환적으로 적용시켜 매개변수를 새롭게 보정할 수 있도록 하였다.

##### 가) 목적함수

RETFLO모형은 홍수유출모형이므로 수문곡선의 홍수부에 상대적 비중이 더 큰 목적함수를 사용하였다.

$$F = \sum_i (Q_{oi} - Q_{ei})^2 \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $n$ 은 보정기간,  $Q_o$ 는 관측유출량(mm),  $Q_e$ 는 추정유출량(mm)이다

##### 나) 매개변수의 예민도 분석

이 연구에서는 매개변수의 변화에 대한 모형의

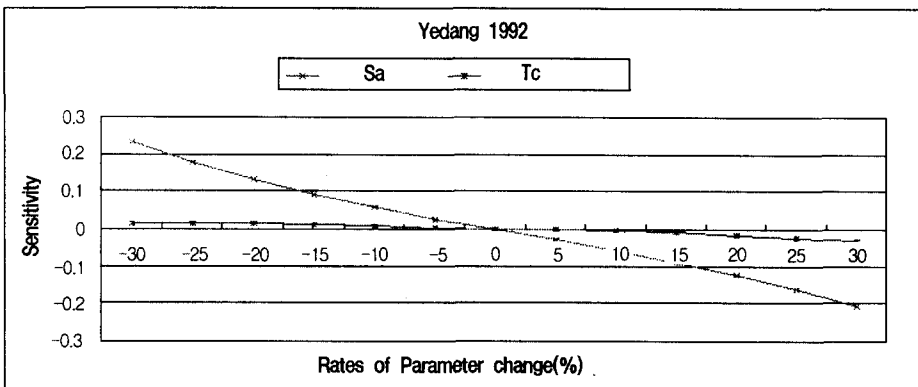


Fig. 4 Sensitivity plot at Yedang reservoir in 1992

반응 예민도를 나타내는 방법을 택하였다. 매개변수는 기준상수에 대하여 5% 간격을 -30%~+30% 범위에서 변화하였으며 예당지에 적용한 결과 Fig. 4와 같이 총유출량과 첨두홍수량의 변화에 Sa가 Tc 보다 민감하였다.

$$S_i = 100 [ ( Z_{ij} - Z_{bi} ) / ( Z_{bi} | PC | ) ] \dots\dots\dots(2)$$

여기서,

$S_i$ : 매개 변수  $i$ 에 대한 예민도

$Z_{ij}$ : 매개 변수  $i$ 의  $j$ 번 상수에 대한 모형의 반응

$Z_{bi}$ : 매개 변수  $i$ 의 기준 상수에 대한 모형의 반응

|PC| : 매개변수의 절대 변화 퍼센트

#### 다) Simplex method<sup>8)</sup>

이 연구에서는 매개변수의 결정을 위한 최적화 기법의 하나인 비선형 Simplex method를 택하여 매개변수 보정을 실시하였다. Simplex method는 Nelder 와 Mead(1965)<sup>8)</sup>에 의하여 개발되었으며 Simplex란 다변량이 형성하는 점으로 이루어진 다면형을 말한다. Simplex method는 목적함수가 최대인 꼭지점을 버리고 반사, 확장, 축소, 수축등의 과정을 거치면서 목적함수가 최소로 되면서 Simplex가 허용오차의 크기로 될 때까지 반복하여 최적의 매개변수 조합을 찾는 방법이며 이 연구에서는 매시간 On-line으로 전송되어 변화하는 자료에 적용하기 위하여 Simplex를 반복 수행하여 추정된값과 실측값의 오차가 최소가 되는 매개변수를 실시간으로 결정하였다.

### IV. 모형의 보정

예당지 유역에서 과거 10년 동안에 발생했던 1989년 9월 14일~15일, 1992년 8월 26일~28일, 1995년 8월 23일~26일의 3가지 호우사상에 대한 홍수 관측자료를 모형의 보정자료로서 적용하였으며, 1995년 8월 23일부터 26일까지의 보정절차를 대표

적으로 예시하였다.

#### 1. Simplex method에 의한 실시간 매개변수 추정

Simplex method로 실시간 매개변수 추정을 실시하였으며 매개변수의 초기값인 잠재저류능(Sa)은 DAWAST로부터 추정된 결과 210mm로서 건조한 상태이었으며 홍수도달시간은 USBR식에 의해 5시간으로 계산되었다. 매시간별 홍수유입예측량과 관측유출량의 차이를 매개변수 보정에 대한 기준으로 삼았다. 그러나 매개변수의 보정된 값이 홍수유입량은 잘 재현하고 있지만 적절한 범위를 초과하는 경우도 발생하여 매개변수값이 적절한 범위<sup>11)</sup>내에서 보정될 수 있도록 제한을 두었다. 그 결과 매개변수보정이 적절한 범위내에서만 이루어지면서 만족할 만한 결과를 나타내었다.

1995년 8월 23일 10시부터 8월 26일 24시까지의 실시간 매개변수 추정절차는 Fig. 5, 6 과 같으며 매개변수 추정에 의한 홍수유입량 예측과정은 Fig. 7 과 같다. Fig. 7-1에서 1995년 8월 23일 22시까지 내린 강우에 의한 관측유입량은 200m<sup>3</sup>/s이며 현재까지 내린 유역강우에 의하여 앞으로 2시간 후에 첨두홍수량 780m<sup>3</sup>/s에 도달할 것으로 예상되며 이때 추정 매개변수는 Sa가 98.4mm, Tc는 397분이었다.

Fig. 7-2 에서 1995년 8월 23일 24시에는 추정 매개변수의 값 Sa가 90.7mm, Tc는 316분 이었으며 현재까지 내린 유역강우에 의하여 예측유입량이 1,205m<sup>3</sup>/s으로 첨두홍수량에 도달할것으로 예상하였으며 실제 관측유입량은 1,200m<sup>3</sup>/s이었다.

#### 2. 보정결과 및 고찰

과거 10년 동안의 보정기간에 발생된 홍수사상에 대하여 관측된 홍수량과 본 모형에 의하여 추정된 홍수량을 비교하였다. 매개변수의 실시간 추정을 통하여 매우 정확하게 홍수유입량을 예측하고 있으며 첨두홍수도달시간은 거의 일치하고 총

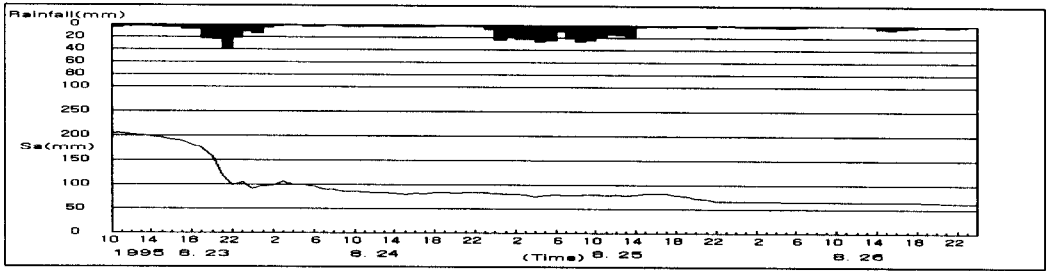


Fig. 5 Retention storage calibrated automatically for storm event occurred from August 23 to 26 in 1995

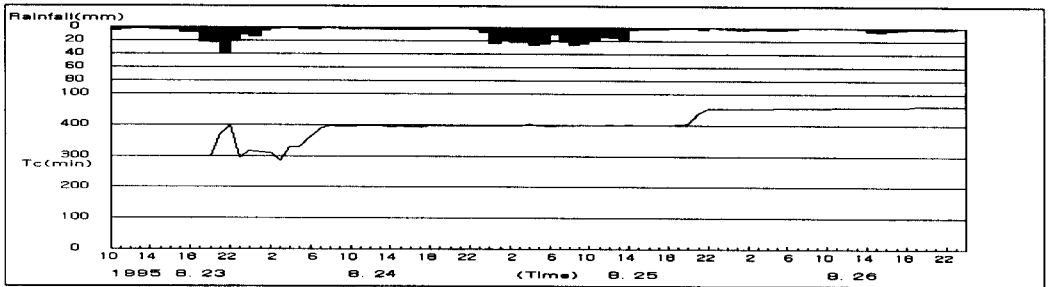


Fig. 6 Concentration time calibrated automatically for storm event occurred from August 23 to 26 in 1995

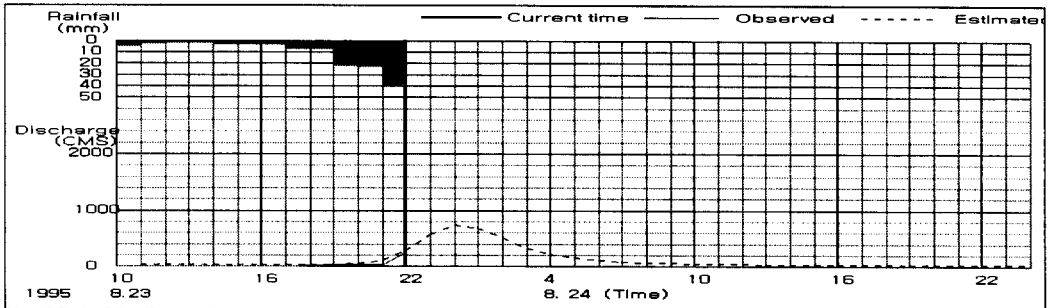


Fig. 7-1 Flood forecasting process for each hour at Yedang reservoir from August 23 to 24 in 1995(1995. 8. 23 22:00)

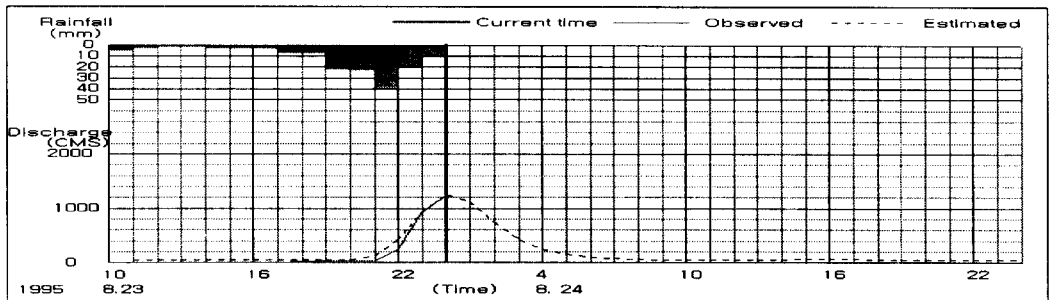


Fig. 7-2 Flood forecasting process for each hour at Yedang reservoir from August 23 to 24 in 1995(1995. 8. 23 24:00)

유출용량에 대한 상대오차의 범위는 -9~16.5%, 첨두홍수량은 -6.7~11.6%의 값의 범위로 나타났다. 보정기간에 적용된 홍수사상에 대한 보정결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Initial values for parameters and relative errors applied to storm events in calibration period at Yedang reservoir

Storm event period	Initial Value for Parameters		Time-to-peak	Relative error	
	Sa (mm)	Tc (minute)		Total volume	Peak discharge
1989.9.15~16	180	300	well - fitted	+16.5%	3.48%
1992.8.26~28	180	300	1 hour delayed	+6%	11.6%
1995.8.23~26	210	300	well - fitted	-8.9%	-6.7%

## V. 모형의 검증

### 1. 실시간 매개변수 추정에 의한 홍수유입량 예측

모형매개변수인 잠재저류량과 홍수도달시간을

자동보정하여 매시간 feed-back하여 홍수유입예측량과 관측유입량과의 오차를 최소화하는 과정을 1999년 8월2일 12시부터 8월 3일의 24시까지의 보정절차를 예시하면 Fig. 8, 9와 같으며 1999년 8월2~3일의 시간별 홍수유입량예측과정을 부분적으로 예시하면 Fig. 10과 같다.

Fig. 10-1 에서 1999년 8월 2일 21시까지 내린 강우에 의한 관측유입량은  $380\text{m}^3/\text{s}$ , 예측유입량은  $360\text{m}^3/\text{s}$ 이었으며 이때 최적 매개변수의 값 Sa가 48.3mm, Tc는 306분이었으며 현재까지 내린 유역강우에 의하여 앞으로 1시간 후(22시)에는 첨두홍수량  $510\text{m}^3/\text{s}$ 으로 예상되었다. 실제로 22시의 실제유입량은  $455\text{m}^3/\text{s}$ 이었고 매개변수의 값은 Sa가 46.0mm, Tc가 329.2분으로 새롭게 변화되었다. 또한 이 시간 이후 강우가 계속되어 예측유입량은 점차 크게 평가되었으며 1999년 8월 3일 03시까지의 누가강우<sup>o)</sup> 의한 예측유입량은 Fig.10-3에서와 같이  $1,158\text{m}^3$ 이었으며 실제유입량은  $1,074\text{m}^3$ 이었다. 이때의 최적매개변수의 값은 Sa가 43.6mm이고, Tc가 313분이었으며 현재까지의 유역강우로 거의 첨두홍수량에 도달할 것으로 예측하고 있다.

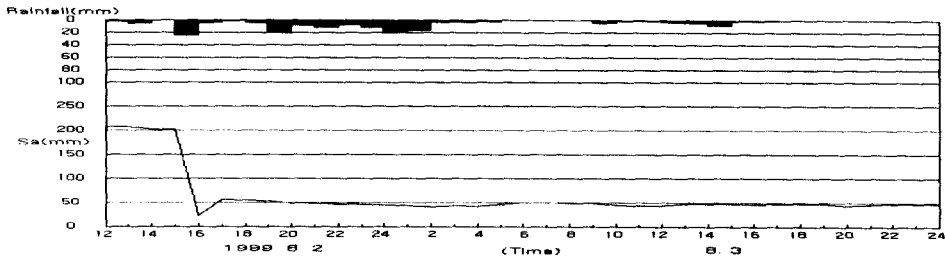


Fig. 8 Retention storage calibrated automatically for storm event occurred from August 2 to 3 in 1999

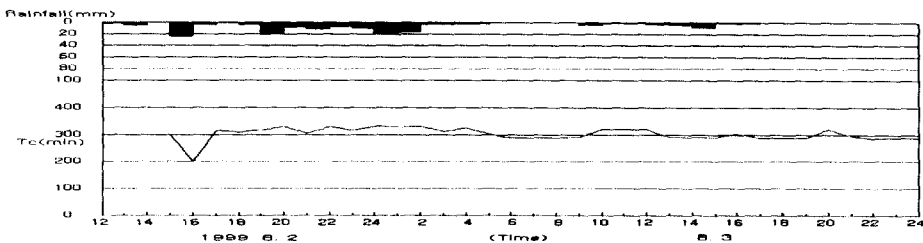


Fig. 9 Concentration time calibrated automatically for storm event occurred from August 2 to 3 in 1999

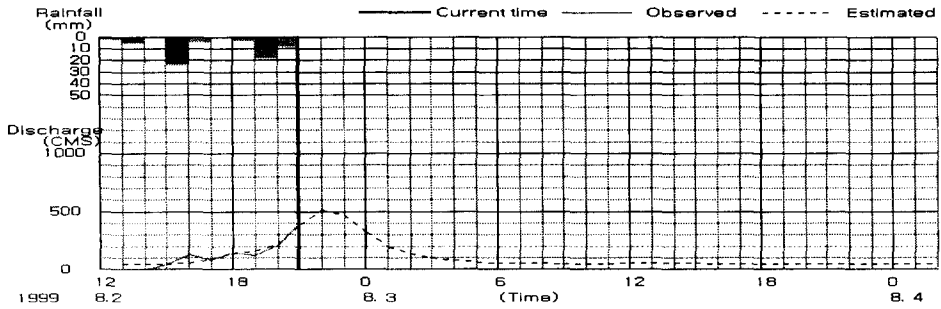


Fig. 10-1 Flood forecasting process for each hour at Yedang reservoir from August 2 to 4 in 1999 (1999. 8. 2 21:00)

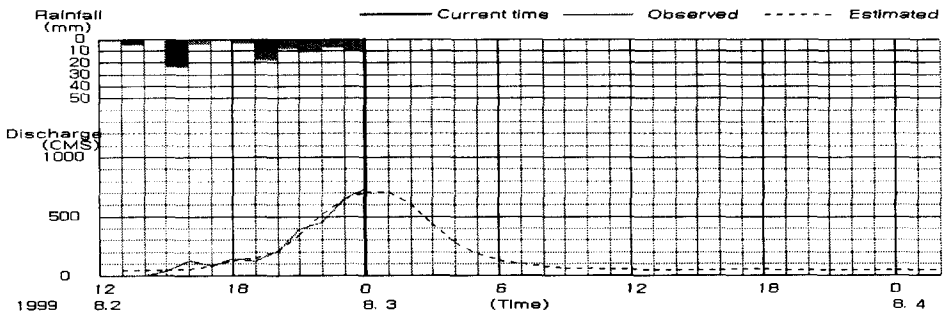


Fig. 10-2 Flood forecasting process for each hour at Yedang reservoir from August 2 to 4 in 1999 (1999. 8. 2 24:00)

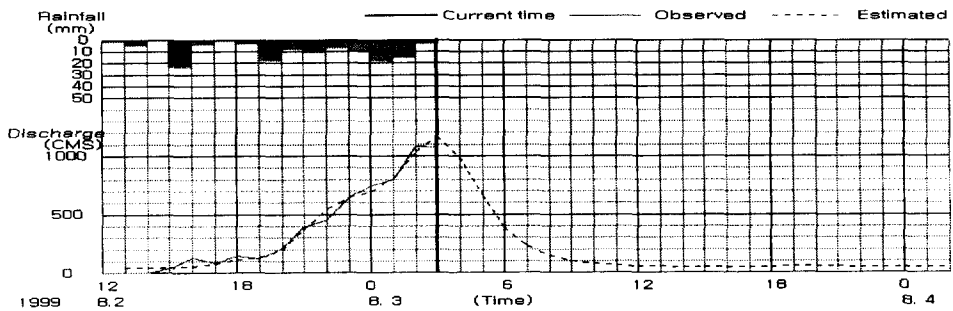


Fig. 10-3 Flood forecasting process for each hour at Yedang reservoir from August 2 to 4 in 1999 (1999. 8. 3 03:00)

## 2. 검정결과 및 고찰

검정기간에 발생한 홍수사상에 대하여 관측된 홍수량과 본 모형에 의하여 추정된 홍수량을 비교하였으며 그 결과는 실측치와 높은 재연성을 보였

다. 실시간 매개변수의 자동추정을 통하여 매우 정확하게 홍수유입량을 예측하고 있다. 첨두홍수도달시간은 1시간 지체되었으며 총유출용량에 대한 상대오차의 범위는 -10%의 값으로 나타났고 첨두홍수량은 -2.8%의 값으로 매우 양호한 결과



Table 2 Initial values for parameters and relative errors applied to storm events in verification period at Yedang reservoir

Storm event period	Initial Value for Parameters		Time-to -peak	Relative error	
	Sa(mm)	Tc (minute)		Total volume	Peak discharge
1999.8.2 ~4	180	300	1 hour delayed	-10%	-2.8%

를 나타냈다. 결과는 Table 2와 같다.

## VI. 결 론

퍼스컴을 이용하여 행정자치부의 방재시스템으로부터 강우와 수위자료를 전송받아, Kalman filter 기법의 기본적인 개념을 Simplex method에 적용하여 실시간으로 매개변수추정을 실시하고 SCS 합성단위유량도를 적용하므로써 정확하고, 신속하게 실시간 홍수유입량을 예측하는 Black box형 홍수예측모형을 개발하였다.<sup>4,6)</sup>

개발된 실시간 홍수예측모형을 예당지에 적용하여 모형을 검증하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 행자부 방재망으로부터 강우량을 On-line으로 전송받아 유역의 토양수분상태(Sa)와 홍수도달시간(Tc)을 매개변수로 선택하여 최신 수집되는 관측자료를 가장 잘 반영하는 최적의 매개변수값을 실시간으로 추정하여 SCS합성단위유량도로 홍수유입량을 예측하였다.
2. 예당지유역에 적용한 결과 총유출용량은 상대오차  $\pm 10\%$  이내의 값을 예측되었다. 첨두홍수량은  $\pm 5\%$  이내의 값을 보였으며 첨두홍수도달시간은 1시간 이내에서 실측값과 일치하였다.
3. 이 연구에서 개발된 모형은 구조가 간단하고 매개변수가 2가지이며 매개변수초기값 산정이 매우 편리하다. 또한 매개변수 초기값을 매시간 보정할 수 있도록 구성되어 있어 관측자료가 없는 관개저수지에도 적용 가능하다.
4. 관개저수지에서 On-lien에 의한 실시간 홍수

유입량 예측이 가능하므로 적절한 방류량을 제시하는 저수지 수문조작모형을 개발할 수 있다. 또한, 방류량에 따른 저수지 상, 하류의 침수피해를 최소화할 수 있는 침수예측모형을 개발한다면 보다 정확하고 신속한 관개저수지의 홍수관리<sup>4)</sup>가 가능하게 될 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 건설부, 홍수량 추정을 위한 합성단위도 유도 연구보고서, 1974.
2. 건설부, 안성천 홍수 예경보 프로그램 개발, 1994.
3. 김태철, 노재경, 박승기, 유역토양수분추적에 의한 유출모형 한국농공학회지 33(4), pp.61-72, 1991.
4. 농림부, 관개저수지의 한발 및 홍수 예측기법과 관리지침 개발, 1999
5. 농어촌진흥공사, 한국하천의 일 유출량 추정 실용화모형 (I), 1990
6. 문종필, 중·소하천 및 관개저수지의 실시간 홍수예측모형, 충남대학교 박사학위논문, 2000
7. 정동국, 이길성, 강우-유출모형을 이용한 실시간 홍수예측 (I) : 이론과 모형화, 한국 수문학회지 27(1), pp.89-99, 1994.
8. Nelder, J. A. and R. Mead, A simplex Method for Functional Minimization, The computer Journal 9, pp.308-313, 1965.
9. Hydrologic Engineering Center, HEC-1 Flood Hydrograph package User's manual, U. S. Army Corps of Engineering, 1990.
10. Hino, M., and C. H. Kim, Nonlinear Flood Forecasting by The Filter Separation Method, J. of Hydrology 88, pp.164-184, 1986.
11. Johnston, P. R. and D. H. Pilgrim, Parameter Optimization for Watershed Models, Water Resour. Res. 12(3), pp.477-486, 1976.
12. Kalman, R. E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Theory, Tran., ASME, J. of Basic Eng. 82, pp.35-45, 1960.