# 유출 모델에 의한 손실함수의 결정

## Optimal Determination of Loss Rate Functions by Runoff Modelling

이 재 형*
Lee, Ja Hyung
황 만 하**
Whang, Man Ha

**Abstract**

An optimization model is presented that can be used in the determination of a loss rate function and conceptual runoff models using observed rainfall and runoff data.

In order to estimate the lumped parameters and to control inputs of the model, the differential equations, linear for underground flow and non-linear for overland flow, are transformed into state equations.

Parameters of a loss rate function and runoff model under stationary assumption can be determined by the following procedures: optimization technique, linear control and non-linear curve fitting theory using several multiperiod storms simultaneously or using individual multiperiod storms. An infiltration equation that includes rainful intensity is used to dtermine the effective rainfall for a given rain of varying. The optimization model is applied to storms in Hyong Song watershed of Wonju area. The results of the new model are compared with earlier one.

요 지

유출 특성이 정상이라는 가정하에 침투능식의 매개 변수들을 추정하기 위해 다음의 절차를 고안하였다 : ① 최적화기법에 의하여 유출모형의 제 매개변수를 추정한다. ② 추정된 매개 변수들이 정상이라는 가정하의 기간 동안에 발생한 호우들에 대해 적합성을 보이도록 유효우량을 제어한다. ③ ①~②의 절차를 반복하여 모든 매개 변수들이 평형상태에이르면 최적 제어된 손실우량을 수식으로 표현하기 위하여 비선형 fitting을 적용한다.

이때 손실우량은 강우심도를 반영하도록 한다.

횡성 유역의 연속된 3개의 호우에 대해 위 기법을 적용한 결과, 선정된 얼개와 고안된 절차는 관측치에 충분한 적합성을 보였고 과거 연구와도 비교하였다.

*정회원 · 전북대학교 공과대학 조교수, 토목공학과
**정회원 · 전북대학교 대학원

## 1. 서 론

강우발생으로 인한 유역의 응답은 유량으로써 나타난다. 일반적으로 강우는 차단, 증발산, 침투 등으로 인해 전량이 지표유출로 전환 되지는 않는다.

침투로 인한 손실은 후에 지하유출의 원인이 되며 강우와 유출 사이의 관계 설정에 어려움을 준다.

침투량을 계량하는 것은 홍수량산정의 첫번째 작업이다. 종래의 $\phi$ 지표법, $w$ 지표법 등은 강우와 유출결과로부터 손실총량을 계산한 다음 일정한 율로 침투된다고 가정하는데 근사해법으로 오랫동안 사용되어 오긴했지만 실제의 침투기구와는 물리적으로 상당한 차이가 있다. 또 경험적인 S.C.S 방법은 방대한 측정자료가 요구되고 물리적인 제 변수의 평가에 어려움이 많다.

5일 선행강우, 유출자료, 강우 총량 등으로부터 손실총량을 결정하는 방법은 선행강우가 침투능에 미치는 영향을 고려하여 직접유출 발생 이후 침투가 일정하다고 생각하는 방식이다. 그러나, 이 방식은 직접유출이 전제되어야하므로 기저 유출분리는 여전히 과제로 남는다.

연속방정식과 운동량방정식에 근거하여 수학적 모형을 구성하고 이들의 해인 침투능식을 이용하여 손실을 산정하는 방법으로 Horton[1], Kostiakov[2], Philip[3]의 방정식 등이 있다. 침투량을 공간과 시간의 함수로 나타내기 위해서는 많은 가정을 수반하게 된다. 단순화를 거쳐 결정된 침투능식들의 매개 변수들의 측정은 현장실험을 수반하는 등 이 변수들을 산정하기가 쉽지 않다.

또한 손실함수는 단위유량도로부터도 구할 수 있다. 즉 직접 유출로 산정할 때 도입되는 손실량을 손실함수식으로 사용함으로서 발생하는 오차를 최소화하는 방식으로, 매개 변수를 추정하는 방식인데 우량도는 강우사상으로부터 유발되기 때문에 기록된 복합강우로부터 여러개의 첨두가 발생하는 유량도를 고려하는 모델선정과 그 해석이 어렵고 같은 유역에 대해서도 강우형태에 따라 유량도와 손실함수의 매개변수가 변하는 난점이 있다.

이러한 난점을 해결하기 위해 Bender and Roberson[4], Deininger[5], Newton and Vinyard[6], Singh[7], Eagleson et al[8], Diskin and Boneh[9], Bree[10], Mawdsley and Tagg[11], Boorman and Reed[12]등은 연속근사해법(successive approximation), 최소자승법(least squares), 최적화 기법(optimization techniques)등의 기법을 통하여 손실 함수의 매개 변수와 단위유량도를 추정하였다. 그러나 이들 기법들에 의한 것은 가정된 손실함수에 의해 초과강우량이 결정되어 있어야 하며 기저유출이 전제되어야 한다.

Mays and Coles[13]는 복합강우의 초과 강우량에 대한 단위 유량도의 종거와 손실함수의 매개변수를 평가하기 위해서 유효우량과 단위유량도로부터 유출모형을 설정하고 선형계획법에 의한 매개변수 추정모형을 제안하였다. May and Tour[14]는 직접유출의 실측치와 계산치의 차를 자승하여 목적함수로 취하는 비선형 계획법에의한 유효우량과 단위유량도의 종거추정 모형을 제안하였다.

이 모델에 지수형태의 침투능식을 고려하여 단위유량도의 종거 및 손실함수의 매개변수를 추정하는 비선형 모형의 연구가 Ünver and Mays[15]에 의해 시도되었다.

이는 기저 유출을 문제 삼지않는 도시 유역에 적용함으로써 상류유역에서의 직접 유출량 추정에는 어려움이 따른다.

본 연구는 실제 강우 유출자료로부터 강우량을 직접유출, 지하유출로 변환하는 과정을 통해 실제 손실에 기여하는 침투능식의 매개변수 산정에 목적이 있다. 유출모형의 매개변수를 산정함에 있어서 유출특성이 정상이라고 가정 할 수 있는 일련의 수문곡선을 고려할 수 있도록 최적화 기법을 이용하였다. 또 초기에 가정하는 손실량의 영향을 배제하기 위해서 제어기법을 도입하였는데 이때 침투능식을 제어변수로 택함으로써 상수, 변수의 시간적인 변화를 배제하기 위해 비선형 fitting 방법[27]을 도입하여 침투능식의 골격을 유지시켰다.

## 2. 얼개구성

유량에 발생한 강우는 대체로 지표와 지하로 유하하여 유출구에 모여든다. 유출과정은 지표를 여행하는 경우와 지하를 여행하는 경우는 판이하고 각 각의 경우, 공간상의 제요소에 따라 복잡한 과정을 거치게 된다. 강우량을 유출로 변화함에 있어 제 요소의 공간 분포를 고려하여 물리적인 법칙에 따라 편미분 방정식을 해석하는 방식과 저류와 유입—유출의 연속방정식에 근거를 둔 상미분 방정식을 해석하는 방식이 연구되어 왔다. 전자의 경우가 실제의 현상에 가깝기는 하지만 검정에 필요한 많은 자료가 요구되어 후자의 방식을 택하여 손실율과 유출의 얼개(conceptual model)를 구성하였다.

### 2.1 직접유출 변환과정

유효강우를 직접유출로 변환하기 위한 선형모형은 유역을 한개 또는 일련의 개념적 저수지로 취급하며 지표저류량 $S_d$는 직접 유출량 $Q_d$에 선형적으로 비례하는 것으로 가정한다.

$$S_d=K_dQ_d \quad \cdots\cdots(2\text{-}1)$$

이때 지표를 하나의 저수지로 본다면, 유입량 $I_d$와 유출량 $Q_d$의 차는 지표저류량 $S_d$의 시간적 변화율과 같다. 즉,

$$I_d-Q_d=K_d\frac{dt}{Q_d} \quad \cdots\cdots(2\text{-}2)$$

식(2-1)의 선형가정은 Chow[17]에 의해 비선형 관계로 수정되었다.

$$S_d=K_dQ_d^N \quad \cdots\cdots(2\text{-}3)$$

지표 유출량에 대한 자연하천의 영향이 현저하다고 생각한 최초의 연구자는 Prasad[18]였다. 실제 자연하천에서 저류량과 유출량 사이에는 loop를 형성하며 일대일 대응관계 설정시는 지표유출은 등류의 박층흐름(uniform sheet flow)으로 가정할 때 이론적으로 가능하다[19]. 따라서 홍수량의 시간적 변화율을 고려한 Prasad 모형이 실제흐름에 보다 접근한다. 즉,

$$S_d=K_{d1}Q_d^N+K_{d2}\frac{dQ_d}{dt} \quad \cdots\cdots(2\text{-}4)$$

(2-2)식과 (2-4)식을 상태방정식으로 고쳐쓰면[20],

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1(t)\\ \dot{x}_2(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -e_0 & -e_1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ h\end{bmatrix}I_d(t) \quad \cdots\cdots(2\text{-}5)$$

여기서 $e_0=\frac{1}{K_{d2}}$, $e_1=\frac{K_{d1}}{K_{d2}}NQ_d^{N-1}$,

$h=\frac{1}{K_{d2}}$이다.

출력 방정식은

$$Q_d(t)=[1,0]\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\end{bmatrix} \quad \cdots\cdots(2\text{-}6)$$이 된다.

### 2.2 기저유출 변환모형

유출성분중 복류수나 지하수의 기여는 강우형태에 밀접하게 관계되어 있다. 지수형태로 감소하던 기저유출은 손실우량의 영향으로 강우시작과 더불어 증가하게 된다. 이는 복류수의 증가나 지하수의 증가를 의미한다.

지표유출과 마찬가지로 지하구조를 저수지로 간주하는 것은 어렵지 않다. Eagleson[24]은 운동량 방정식을 기저유출이 흐름층의 두께에 선형적으로 반비례한다고 했다. 또 Afouda[22]에 의하면 손실우량과 기저유출의 차는 지하 저류량의 변화율과 같다는 연속방정식의 설정이 가능하다. 이들을 근거로하여 전 절의 직접유출량의 상태변수모형과 같은 기저유출의 변환 모형을 구성할 수 있다. 즉,

$$Q_g(t)=\varepsilon x_3(t) \quad \cdots\cdots(2\text{-}7)$$

$$\frac{dx_3(t)}{dt}+\varepsilon x_3(t)=\bar{I}_g(t) \quad \cdots\cdots(2\text{-}8)$$

와 같이 된다. 여기서 $\bar{I}_g(t)$는 침투량이 복류수나 지하수에 도달하는데 걸리는 지체시간을 고려한 지하유입량이며 $x_3(t)$는 지하 저류량이다. 또 $Q_g(t)$는 지하 유출량인데 지하 저류량에 비례하고 그 비례상수는 $\varepsilon$이다.

### 2.3 손실우량

손실우량은 현장실험을 함으로써 시간에 따른 침투상태를 파악할 수 있다.

그러나 실험상 어려움이 따르게되므로 전유역이 평균적으로 일정한 침투율을 가진다고 생각하는 개념적인 침투능식을 고려할 수 있다. 그 대표적인 예로는 Horton[1], Kostiakov[2], Philip[3]식들이 있다. 최근 Ünver and Mays[15]의 연구에 의하면 Kostiakov의 식이 실행상 편리하고 비교적 정확하다는 것이다.

본 연구에서는 보다 일반적인 지표 및 지하함수(water content) 상태하에서 지표에 피복되는 강우량의 심도변화는 침투에 영향을 준다[23]. 즉 침투율은 포화도의 두께와 지표수의 심도에 따라 달라지게 된다. 따라서 Kostiakov 의 침투능식에 지표수심도를 대표한다고 가정한 강우강도 $I(t)$를 반영한 침투능식을 선정하였다.

$$f(t)=\frac{\alpha A}{t^{1-\alpha}}[I(t)]^{E} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\text{-}9)$$

여기서 $f(t)$는 침투율이며 $A, \alpha$는 침투층의 성질을 나타내는 상수이고 $E$는 강우심도를 침투율에 반영하는 상수이다.

## 3. 최적변수 추정

강우로부터 유출로 변환되는 과정을 구체적인 형태로 전환하기 위해서는 각 열개가 가지고 있는 상수들을 가정한 유출량과 그에 대한 실측치를 비교해서 교정할 수 있는 장치가 마련되어야 한다. 그러나 미지의 매개변수는 손실에 관여하는 $\alpha$, $A$, $E$, 기저유출이 관여하는 $\varepsilon$, 지체시간, 직접유출에 관여하는 $Kd_1$, $Kd_2$, $N$등 8개인데 비해 비교가능 변량은 유출량 하나 뿐이다. 여기서 각 매개변수는 상수이고 비교량은 시간에 따른 변량이라는데 주목해 볼 필요가 있다. 따라서 손실량을 제어 변수로 택하여 유출 열개로부터 얻어진 유출량과 관측치의 차를 최소로 하도록 상수를 정한 다음 상수로 대변하기 어려운 양을(불변계 모형(invariant model)은 첨두유량이 과소평가되는 경향이 있음[24])제어한다. 이때 제어변수의 초기치는 $\phi$ 지표법에 의해 분리된 손실량을 택할 수 있다. 손실함수는 시간에 대해 explicit 함수 또는 implicit 함수 등 어느 것이나 택할 수 있다.

### 3.1 유출모형의 매개변수 추정

유출의 실측치는 직접유출과 기저유출의 합으로 나타내기 때문에 유출열개는 $Q=Q_d+Q_g$로 통합하여 목적함수를 다음과 같이 설정한다.

$$\mathrm{Min}\sum_{i=1}^{M}(Q_{(di)\mathrm{model}}-Q_{(di)\mathrm{actual}})^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3\text{-}1)$$

여기서 $i=1$은 임의 유출개시점을 나타내고, $i=M$은 임의 유출종점을 나타낸다. $M$은 유역의 유출 특성이 변하지 않는다고 생각할 수 있는 기간을 고려하여 결정한다.

식(3-1)을 만족하도록 $Kd_1$, $Kd_2$, $N$, $\varepsilon$, 지체시간 등을 결정하는 과정은 두개로 나눌 수 있다. 즉 제상수의 최적값을 추적하는 과정과 이를 수정하기 위해 상태방정식의 해를 구하는 과정과 이를 수정하기 위해 상태방정식의 해를 구하는 과정이다. 최적화를 위해서는 미분이 필요치 않은 Hook and Jeovcs Algorithm[25]을 이용하였다. 그 절차는 다음과 같다.

Minimize $F(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5)$

$$=[Q_{\mathrm{model}}-Q_{\mathrm{actual}}]^T[Q_{\mathrm{model}}-Q_{\mathrm{actual}}] \cdots(3\text{-}2)$$

여기서 $Q_{\mathrm{model}}=f_n(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5)$,

$y=\{K_{d1}, K_{d2}, N, \varepsilon,$ 지체시간$\}$, $T$ : 전치이다.

식(3-2)를 최소로 하기 위해 각 상수의 명목값(nominal value)을 가지고 상태방정식을 적분하여 목적함수 값을 계산한 다음 $y_i$ 방향으로 진행폭 만큼 변화시켜 더 적은 목적함수가 얻어지는 가를 살핀다. 만일 감소되지 않았을 때는 진행폭을 줄이고 다시 추적한다. 감소 되었다면 이전의 값들을 이용하여 값을 쇄신한다.

$$y_{i,0}^{j+1}=y_i^{j+1}+\gamma(y_i^{j+1}-y_i^j) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3\text{-}3)$$

여기서 $j$는 반복지수이며 0는 일시적인 값을 의미한다. 또 $\gamma$는 가속계수이다. $y_{i,0}^{j+1}$에 의해 더 적은 목적 함수를 얻었다면 이 값을 기초로 하여 새로운 값을 찾는다. 그렇지 않았다면 이전의 값으로 다시 추적한다. 위와 같은 절차를 허용 범위내에 들도록 반복한다.

### 3.2 유입량 최적 제어

손실량의 명목값을 $\phi$ 지수에 의해 정했을 때, 이 값에 의한 유출열개의 제 상수는 근사값이고 여러개의 호우 사상으로 야기된 유출곡선을 상대로 공통인 상수가 구해진 것이므로 계산한 유출량은 관측치와 잘 부합되는 수문곡선도 있고 그렇지 못한 경우도 있다. 따라서 유출특성이 정상이라고 가정했기 때문에 상수들은 모든 수문곡선에 공통이어야 하는데 잘 부합되지 않는 경우는 유효우량의 가정이 잘 못된 것임에 틀림없다. 이때는 잘 부합되지않거나 최적화 과정에서 못 미친 유출량은 손실량을 제어해줌으로써 가능하다. 위와 같이 하기 위해서 동적 최적 모형을 다음과 같이 구성한다.

상태식 : $\dot{x}_1(t)=x_2(t)$ )

$$\left.\begin{aligned}\dot{x}_2(t)=&-\frac{x_1(t)}{K_{d1}}\\&-\frac{K_{d1}}{K_{d2}}NQ_d^{N-1}x_2(t)\\&+\frac{1}{K_{d2}}(I(t)-Z_1(t)I(t)^{x_2(t)})\\\dot{x}_3(t)=&-\varepsilon x_3(t)+\bar{I}_2(t)\\\dot{x}_4(t)=&(x_1(t)+\varepsilon x_3(t)-Q_{(t)\text{actual}})^2\\\text{또는 }\dot{x}=&g(x,z)\end{aligned}\right\}\cdots(3\text{-}4)$$

목적 함수식 : Min $\phi(x_4(t))$ ……(3-5)

제약 함수식 : $0\leqq x_1(t), -\infty\leqq x_3(t)\leqq+\infty$

$0\leqq z_1(t)\leqq I(t),\ 0\leqq z_2(t)\leqq 1$. ……(3-6)

여기서 $z_1(t)I(t)^{z_2(t)}$는 손실함수를 제어에 맞추어 변형한 것이다. 여기서 $z_1(t)$와 $z_2(t)$는 제어변수이다. 식 (3-4)~(3-6)을 만족하도록 $z_1$과 $z_2$를 최적 제어하기 위해서는 여러방법이 가능하다. 여기서는 제어자체가 목적이아니므로 다소 계산시간이 많이 소모되더라도 간편한 선형 최적 제어기법을 이용하였다[26].

식 (3-4)~(3-6)의 해를 구하기 위한 Algorithm은 다음과 같은 반복 절차이다.

$z^{j+1}(t)=z^j(t)+\gamma z(t),\ 0\leqq\gamma\leqq 1$ ……(3-7)

$\Delta z(t)=rU(t)^T\cdot\lambda^*(t)$

$\dot{\lambda}^*(t)=-U(t)^T\cdot\lambda^*(t)$

$\lambda^*(1)=\text{grad}\phi(x_4(1))$……(3-8)

$U=\frac{\partial g_i}{\partial x_j},\ W=\frac{\partial g_i}{\partial z_j},\ r=\frac{K_1}{\|B(t)^T\cdot\lambda^*(t)\|}$

여기서 $\|\cdot\|$는 길이의 척도이고, $K_1$은 임의 상수이다.

### 3.3 손실 함수 결정

전 절에서 제어의 편의상 손실함수를 $z_1(t)I(t)^{z_2(t)}$로 변형하여 제어를 실시하였다. 그러나 유출 특성이 정상이라는 가정하에서는 침투능도 시간에 따른 불변 구조를 가져야함으로 수량적으로 주어진 제어값을 이용하여 원래의 손실함수 형태로 바꾸어 줄 필요가 있다. 이때 발생하는 문제는 손실함수가 각 상수에 대해 비선형으로 표현되어 있으므로 비선형 fitting이 용이하지 않다는 점이다. 이러한 난제를 해결하기 위한 방법이 J.P. Ottoy[27]에 의해 제안되었다. 그 방법은 다음과 같다.

$f=\upsilon(A,\alpha,E;\ t)$

$=\upsilon(a,b;\ t)$

$=\sum a_j\upsilon_j(b;\ t)+\upsilon_0(b;\ t)$ ……(3-9)

함수 $\upsilon_j$는 $b$에 대해서 비선형인 $\alpha$이고, $a=(A,E)$에 대해서 선형이다. 식 (3-9)와 최적제어에서 얻어진 값의 차를 최소로하도록 제 상수를 추정한다. 즉,

$r_1(a,b)=[z_1(t)^{z_2(t)}-a_j\upsilon_j(b;\ t)-\upsilon_0(b;\ t)]^T$

$[z_1(t)I(t)^{z_2(t)}-a_j\upsilon_j(b;\ t)-\upsilon_0(b;\ t)]$

……(3-10)

이때 식(3-10)의 각 항을 다음과 같이 취하면

$\psi=f-\upsilon_0(b;\ t_i)$

$\Phi=\upsilon_j(b\ t_i)$

식 (3-10)은 $r_1(a,b)=\|\psi-\Phi a\|^2$ ……(3-11)

로 변환되고 식 (3-11)을 최소로 하는 선형계수는

$a=(\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^T\psi$ ……(3-12)

여기서 $a$는 $b$에 의존하게 되고 식 (3-12)에 의해 주어졌다고하면 식 (3-11)은

$r_2(b)=\|\psi-\Phi(\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^T\psi\|^2$……(3-13)

이 된다. J.P. Ottoy[27]에 의하면 $b$가 식(3-13)을 최소로하면 $(a,b)$는 $r_1(a,b)$의 최소추정치라는 것이다.

## 4. 수치실험 및 고찰

이상 기술한 방법의 효율성 및 정확도를 보이기 위해 남한강 상류에 위치한 횡성[30]유역을 택하였다. 유역 면적은 433 km²이고 강우 및 유출자료는, 1980년 8월 18일에서 동년 9월 10일 사이의 연속 수문곡선 및 강우량이다. 이때의 자료를 사용하는 것은 저류 함수법의 제상수 분석을 위해서 비교적 정확한 실측자료가 획득되어 있었기 때문이다. Thiessen 방법을 이용하여 평균된 강우량이 유입량의 실측치로 사용되었다.

$\phi$ 지표법을 사용하여 강우량을 유효우량과 손실우량으로 분리한 다음, 손실우량은 기저유출의 입력으로, 유효우량은 지표유출의 입력으로 사용하였다. 초기 상수 값을 변화시켜가며 각 상수의 적절한 최적값을 선택하였다.

분석 기간에 발생한 호우로 3번의 첨두를 가진 연속수문 곡선중에서 각 상수에 적합하지 않은 부분수문곡선이 발견되었다. 이에 따라 손실

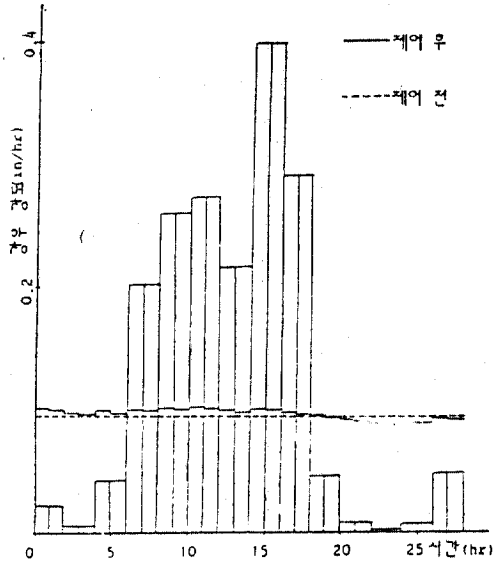


**그림 4-1.** 제어에 의한 손실함수의 변화(8월 25일강우)

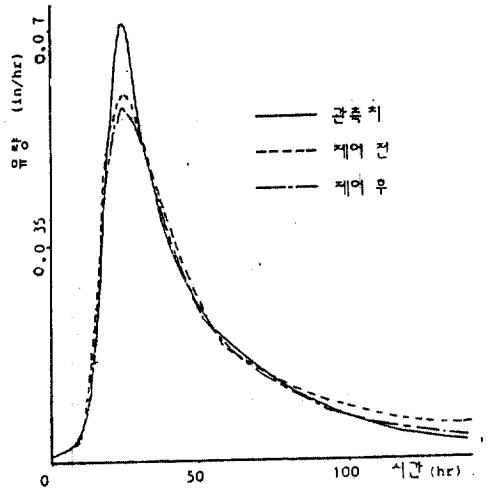


**그림 4-2.** 제어에 의한 유량의 변화

량의 제어효과를 파악하기 위해서 최적제어를 실시한 결과를 그림 4-1과 4-2에 도시하였다. 그림 4-2에서 강우량의 재분배가 발생하여 초기손실량이 증가하고, 유출수문곡선의 첨두치가 낮아진 반면 감수부에서 상승하는 효과가 나타났다.

재 배치된 유입량으로부터 유출 모형의 제 변수가 변할 것이 예측되므로, 다시 최적과정을 수행하고 추정된 제 상수를 사용한 모형의 입력을 제어하여 변동이 더이상 진행되지 않는다고 판단한 결과를 그림 4-3에 도시하였다. 그림 4-3의 제 상수값은 모든 수문곡선에 공통이기 위해서 손실량을 최적으로 제어했을 때의 값이다. 그림 4-3에서 오차가 수렴했을 때 5개의 변수중 $K_{d2}$를 제외한 나머지 상수는 변동진폭이 미미함을 알 수 있다. $K_{d2}$의 심한 변화에도 불구하고 다른 상수들이 수렴하는 것은 전체적으로 볼 때 $K_{d2}$ 영향이 크지 않다는 것으로 생각된다.

최적 손실량을 손실 함수식으로 변환하기 위해서 비선형 fitting을 한 결과를 그림 4-4에 표시하였다. 강우량보다 침투 능식이 위에 위치했을 때는 여분의 침투능력을 나타내며 $E$값이 0이 아닌 것은 우량심도의 영향이 고려되고 있음을 의미한다. 그림 4-4에서 점선으로 표시된 손실량은 백[28]에 의한 것인데 본 연구에서 추정된 양보다 과대하게 평가되고 있음을 나타낸다. 최종 손실 함수에 의한 기저유출과 그에 따른 유효량으로 야기된 직접 유출량을 그림 4-5에

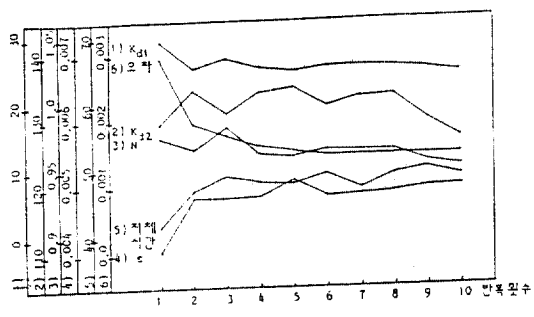


**그림 4-3.** 매개 변수값의 변동

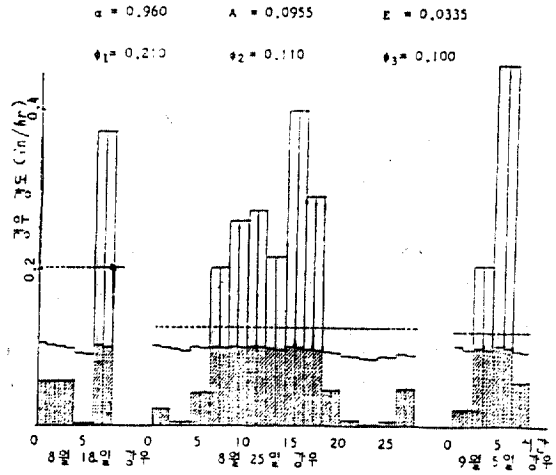


**그림 4-4** 최종 결정된 손실 함수

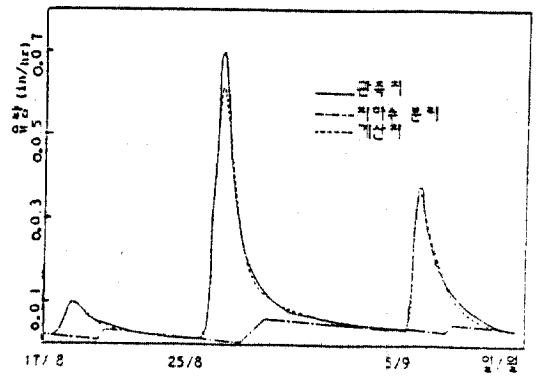


**그림 4-5.** 최종 손실함수에 의한 유량도

도시 하였다. 이 그림에서 가장 큰 차이를 보이는 8월 25일 호우에 대한 첨두량에 있어서도 백의저류 함수법에 의한 190 $m^3/s$ 보다 15 $m^3/s$가 많은 205 $cm^3/s$였다.

## 5. 결 론

지표 유출은 Prasad의 비선형, 기저유출은 선형으로 가정하며 상태변수 모형으로 변환한 다음 최적절차를 이용하여 제 변수를 추정하고 추정된 상수에 의한 계산값이 관측치에 충분히 적합성을 보이도록 손실량을 제어하는 수문법을 반복하여 최적의 손실우량을 정하였다. 지하유출 과정이 정상이라는 가정을 합리화하도록 손실우량을 시간에 대한 explicit 침투능식의 제 상수를 추정하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 강우—유출 자료만을 가지고 유출특성이 정상인 유역을 대표할 수 있는 제 상수의 추정이 가능하다.

2. Prasad의 직접 유출 모형과 선형기저 유출모형은 일개로서의 충분한 적합성을 보였다.

3. 단위 유량도 등 지금까지의 방법에 의하는 경우 손실량이 전제되어 있어야하나, 본 연구에서 제안하는 방법은 손실량이나 기저유출의 전제가 따르지 않는다.

4. 호우별 유출모형의 상수를 추정하는 경우 호우마다 그 상수 값들이 상이하기 때문에 이의 조정이 따르나, 본 연구의 방법은 연속수문 자료를 제어를 통해 손실량을 조절하기 때문에 별도의 조정이 필요없다.

5. 불변계 유출모형에 의한 홍수량을 선정하는 경우 첨두치가 과소 평가되나 손실량을 제어함으로써 어느 정도 보상이 가능하다.

6. 유출특성이 정상이라고 가정할 수 있는 장기 수문 자료를 대상으로 하기 때문에 정상인 기간동안 발생하는 다른 호우의 유출을 예측할 수 있다.

유역의 유출특성은 항상 변하기 때문에 본 연구의 방법에 의해 추정된 값의 유효성을 부여하기 위해서는 장기의 자료 분석이 요구되며 이를 토대로 각 상수의 예측모형이 설정된다면 강우로부터 유출의 예측은 보다 정확해 질 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1) Horton, R.E., "An approach to the physical interpretation of infiltration capacity", *Soil Sci. Am. Proc.*, 5, 399~417, 1940.

2) Kostiakov, A.N., "On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from dynamic point of view for purposes of amelioration", *Trans. 6th Comm. Int. Soc. Soil. Sci.*, Russian Pt. A15~21, 1932.

3) Philip, J.R., "The theory of infiltration: the infiltration and its solution", *Soil. Sci.*, 3, 345~357, 1957.

4) Bender, D.L., and J.A. Roberson, "The use of dimensionless unit hydrograph to derive unit hydrographs for some Pacific Northwest Basins", *J. Geophys. Res.*, 66, 521~527, 1961.

5) Deininger, R.A., "Linear program for hydrologic analysis", *Water Resour. Res.*, 5, 1105~1109, 1969.

6) Newton,D D.W., and J.W. Vinyard. "Computer-determined unit hydrographs from floods,", *J. Hydraul. Div. ASCE*, 93, 219~234, 1967.

7) Singh, K.P., Unit hydrographs "A comparative study", *Water Resour. Bull.*, 12, 381, 1976.

8) Eagleson, P.S., R. Mejia-R, and F. March, "Computation of optimum realization unit hydrographs", *Water Resour. Res.*, 2, 755~764, 1966.

9) Diskin, M.H., and A. Boneh, "Determination of an optimal IUH for linear, time invariant systems from multi-storm records", *J. Hydrol.*, 24, 57~76, 1675.

10) Bree, T., "The stability of parameter estimation in the general linear model", *J. Hydrol.*, 37, 47~66, 1978.

11) Mawdsley, J.A., and A.F. Tagg, "Identification of unit hydrographs from multi-event analysis," *J. Hydrol.*, 49, 315~327, 1981.

12) Boorman, D.B., and D.W. Reed, "Densation of a catchment average unit hydrograph", *Rep. 71, Inst. of Hydrol.*, Wallingford, U.K., 1981.

13) Mays, L.W., and S.L. Coles, "Optimization of unit hydrograph determination", *J. Hydraul. Div. ASCE.* 106(HYI), 85~97, 1980.

14) Mays, L.W., and C.K. Taur, "Unit hydrographs via nonlinear programming", *Water Resour. Res.*, 18(4), 744~752, 1982.

15) O. Unver and L.W., Mays, "Optimal determination of loss rate functions and unit hydrographs", *Water Resour. Res.*, Vol. 20, No. 2, 203~214, 1984.

16) Nash, J.E., "The form of instantaneous unit hydrograph", *Intern. Assoc. Sci. Hydrology Pub.* 45, Vol. 3, pp. 114~121, 1957.

17) Chow, Ven Tee, *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, N.Y., 1959, p. 21.

18) Prasad, A.M., "A nonlinear hydrologic system response model", *J. of Hydraulic Div., ASCE* Vol. 93, No. HY4, pp. 201~221, July. 1967.

19) Cordery, I., "Estimation of design hydrograph for small rural catchment", *J. of Hydrology*, Vol. 13, pp. 226~271.

20) 김경수, Prasad 모델에 의한 형성 유역의 강우—유출 해석, 전북대학교 석사 학위 논문.

21) 김재한, 기저유출 분리를 위한 강우와 감수 곡선 간의 상관해석, **한국 수문 학회지**. 제18권 제 1 호 85~94, 1985.

22) A. Afouda, *A unified approach to watershed modelling*, Nordic Hydrology, 9, 1978, 161~182.

23) D.L. Freyberg and J.B. Franzini, "Infiltration under rapidly varying surface water depths", *Water Resour. Res.*, Vol. 16, No. 1, 97~104, 1980.

24) Afouda, A.A., "A generalized kinematic approach to basin modelling", *Proceedings of the Oxford Symposium*, 1980, IAHS-AISH Publ., no. 129.

25) Hooke, R., and T.A. Jeeves, "Direct search solution of Numerical and statistical problems", *J. Assoc. Comp. Mach.*, 8, 212~229, 1961.

26) Feilmeier, M.P., Gessner, und H.J. Wacker, *Linear Kontrollprollprobleme.* Unternehmens for schung Bd. 14, 1970, Heft 4.

27) J.P. Ottoy, *A computer program for non-linear Curve fitting*, A computational mechanics publication 71~77, 1683.

28) 백운일, 저류함수형 비선형 수문 예측 모형, **대한 토목학회논문집**, 제 2 권 제 2 호, 6, 1983.

29) 선우중호, 수문학, 동명사, 1983.

30) 건설부 한강홍수 통제소, 홍수유출예경보 유출 및 상수분석보고서. 1980.

(接受 : 1985. 9. 9)