

# 산사태 위험도 추정을 위한 간극수압 예측에 관한 연구(Ⅱ)

— 산사면에서의 지하수위 예측 모델의 개발 —

Porewater Pressure Predictions on Hillside Slopes  
for Assessing Landslide Risks(Ⅱ)

— Development of Groundwater Flow Model —

이 인 모\*1  
Lee, In-Mo  
박 경 호\*2  
Park, Kyung-Ho  
임 충 모\*3  
Im, Chung-Mo

---

## Abstract

The physical-based and lumped-parameter hydrologic groundwater flow model for predicting the rainfall-triggered rise of groundwater levels in hillside slopes is developed in this paper to assess the risk of landslides.

The developed model consists of a vertical infiltration model for unsaturated zone linked to a linear storage reservoir model(LSRM) for saturated zone. The groundwater flow model has uncertain constants like soil depth, slope angle, saturated permeability, and potential evapotranspiration and four free model parameters like a, b, c, and K.

The free model parameters could be estimated from known input-output records. The BARD algorithm is used as the parameter estimation technique which is based on a linearization of the proposed model by Gauss-Newton method and Taylor series expansion.

The application to examine the capacity of prediction shows that the developed model has a potential of use in forecast systems of predicting landslides and that the optimal estimate of parameter 'a' in infiltration model is the most important in the global optimum analysis because small variation of it results in the large change of the objective function, the sum of squares of deviations of the observed and computed groundwater levels.

## 요 지

본 논문에서는 가파른 산사면에서 산사태의 발생을 예측하기 위한 수문학적인 지하수 흐름 모

---

\*1 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수

\*2 정희원, 고려대학교 대학원 토목공학과 석사과정수료

\*3 정희원, 목포전문대학 토목과 조교수

델을 개발하였다. 이 모델은 물리적인 개념에 기본하였으며, Lumped-parameter를 이용하였다.

개발된 지하수 흐름 모델은 두 모델을 조합하여 구성되어 있으며, 비포화대 흐름을 위해서는 수정된 abcd 모델을, 포화대 흐름에 대해서는 시간 지체 효과를 고려할 수 있는 선형 저수지 모델을 이용하였다. 지하수 흐름 모델은 토층의 두께, 산사면의 경사각, 포화투수계수, 잠재 증발산량과 같은 불확실한 상수들과 a, b, c, 그리고 K와 같은 자유모델변수들을 가진다.

자유모델변수들은 유입-유출 자료들로부터 평가할 수 있으며, 이를 위해서 본 논문에서는 Gauss-Newton 방법을 이용한 Bard 알고리즘을 사용하였다.

서울 구로구 시흥동 산사태 발생 지역의 산사면에 대하여 개발된 모델을 적용하여 예제 해석을 수행함으로써, 지하수 흐름 모델이 산사태 발생 예측을 위하여 이용할 수 있음을 입증하였다. 또한, 매개변수분석 연구를 통하여, 변수 a값은 작은 변화에 대하여 목적함수값에 큰 변화를 일으키므로 a의 값에 대한 최적값을 구하는 것이 가장 중요한 요소라는 결론을 얻었다.

## 1. 서론

하절기에 집중호우, 폭풍, 태풍으로 인하여 발생하는 산사태는 많은 산악 지역을 가지고 있는 한국에서 가장 큰 자연 재해중의 하나이다.<sup>(1)(4)(5)</sup> '70-'87년 동안에 산사태로 인하여 년평균 66명의 사상자와 14억원 이상의 재산 피해를 입은 것으로 보고되고 있으며, 최근까지도 그 피해가 증가하고 있는 추세에 있다.<sup>(4)</sup> 전세계적으로 많은 산악 지역을 가지는 국가들은 가파른 산사면에서의 산사태 발생 위험도를 평가하기 위한 연구가 진행 중에 있으며, 이러한 자연 사면에서의 안전성 해석을 위해서는 어떤 주어진 파괴 표면을 따라서 한계평형상태 하에서의 전단 저항과 파괴 응력의 비인 안전율로서 평가하는 한계평형이론(limit equilibrium theory)을 주로 이용한다. 이러한 해석 방법은 파괴면의 가정에 따라서 크게 세가지로 나눌 수 있으며, 이는 다음과 같다.<sup>(13)</sup>

- ① 평면 파괴면 해석법(planar slip surface or infinite slope analysis)
- ② 원호 파괴면 해석법(circular slip surface analysis)
- ③ 평면 파괴면이 아닌 비원호 파괴면 해석법(noncircular slip surface analysis)

위의 세 방법중에서 토층의 두께가 사면의 전체 길이에 비해서 상대적으로 얇고, 파괴면

이 사면의 표면과 평행을 이루는 자연사면의 안정 해석 방법으로서 평면 파괴면 해석법을 주로 이용한다.<sup>(9)(14)(17)(20)</sup>

그림 1과 같이 자연 사면을 평면 무한사면으로 간주한 경우, 그 안전율은 유효응력 개념을 사용하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.<sup>(2)</sup>

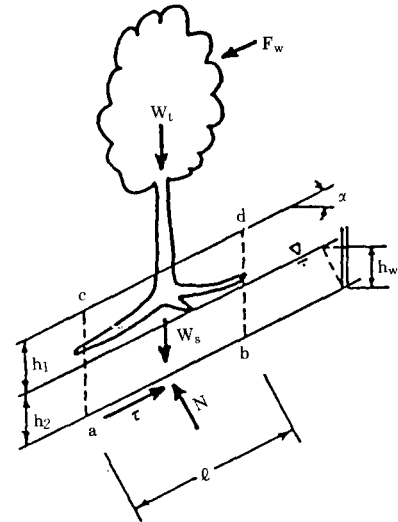


그림 1. Forces on sliding soil mass

$$F_s = \frac{[c' + ((W_s + W_t) \frac{\cos \alpha}{l} - u) \tan \phi' + s_r] l}{(W_s + W_t) \sin \alpha + F_w} \quad (1a)$$

$$u = \gamma_w h \cos^2 \alpha \quad (1b)$$

여기서,  $W_w$ 와  $W_s$ 는 각각 토질과 나무의 무게,  $F_w$ 는 나무가 받는 풍하중,  $c'$ 와  $\phi'$ 는 각각 유효응력개념의 점착력과 전단저항각,  $\alpha$ 는 사면의 경사각,  $s$ 는 전단강도에 대한 뿌리의 보강효과,  $u$ 는 간극수압,  $h$ 는 지하수위이다.

윗 식에서 간극수압은 지하수위의 변동에 의해서 변화하며, 지하수위의 변동으로 인한 간극수압의 상승이 안전율을 감소시켜 산사태를 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 강우에 대하여 지하수위를 예측함으로써 산사태 발생을 예측할 수 있으며, 지하수위를 예측할 수 있는 모델의 개발이 필요하다. 이인모 등은 지하수위 예측 모델 개발을 위하여 물리적인 의미에 기초를 둔 Lumped-parameter 모델들 중 세 개의 비포화대 흐름 모델과 Kinematic Storage model(KSM)의 장·단점을 연구하여 적용 가능성을 조사하였다.<sup>(3)</sup>

본 논문에서의 첫번째 목적은 가파른 산사면에서의 지하수 흐름에 대하여 비포화대와 포화대에서의 저류 능력과 시간 지체 효과를 고려한 물리적인 의미에 기초를 둔 Lumped-parameter 간극수압 예측 모델을 개발하는데 있다. 이 간극수압 예측 모델은 일차원 연직 방향의 지하수 유입량을 구할 수 있는 수정된 abcd 비포화대 흐름 모델과 포화대에 대해서 선형 저수지 모델을 조합하였다.

일반적으로 개념적인 간극수압 예측 모델은 두 종류의 매개변수(parameter)를 가지고 있으며, 이것은 지질도, 지형도, 실내 및 현장 실험으로부터 구할 수 있는 불확실한 상수들(uncertain constants)과 유입-유출(input-output) 기록들로부터 매개변수분석을 통하여 평가하는 자유모델변수들(free model parameters)이다.<sup>(10)</sup> 이 논문에서 제시된 지하수 흐름 모델은 토층의 두께, 사면의 경사각, 포화투수계수와 잠재 증발산량등의 불확실한 상수들과  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $K$ 와 같은 자유모델변수들을 포함하고 있다.

본 논문의 두번째 목적은 불확실한 상수들의

값을 결정하고, 자유모델변수들중 비포화대 흐름을 나타내는  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 를 변화시켜 전체적인 매개변수분석(global parameter estimation)을 수행한 후, 각 모델변수들에 대한 최적 매개변수를 구하고자 하는 것이다. 본 논문에서는 지하수 흐름 모델의 적용을 위하여 선택된 서울 구로구 시흥동 산사태 발생 현장 지역에 대해 최적 매개변수를 구하기 위하여 Bard 알고리즘을 사용하였다. 현장 지역의 적용을 통해 개발된 지하수 흐름 모델은 산사태 발생 위험도 추정을 위한 예측 체계(forecast system)에 대한 적용 가능성을 밝힐 수 있으며, 자유 모델 변수들의 물리적인 의미를 명확히 하여 다른 지역에 대하여 적용할 경우에 최적 매개변수(optimal parameter estimates)를 구하는 데 이용할 수 있다.

## 2. 지하수 흐름 모델

가파른 산사면에서의 지하수 흐름은 그림 2와 같이 비포화대 흐름과 포화대 흐름으로 나눌 수 있다. 강우기간 동안에 차단(intercept) 효과를 무시한다면, 강우는 지표면으로 침투하여 처음에는 비포화대를 흘러 내려가거나 식생이나 지표면을 따라 직접 유출된다. 계속적으로 침투된 강우에 의해서 비포화대가 서서히 포화하게 되며, 산사면의 경사를 통해 아랫 사면으로 흘러 내려가서 지하수위가 상승하는 것을 관측공을 통하여 관측할 수 있다.

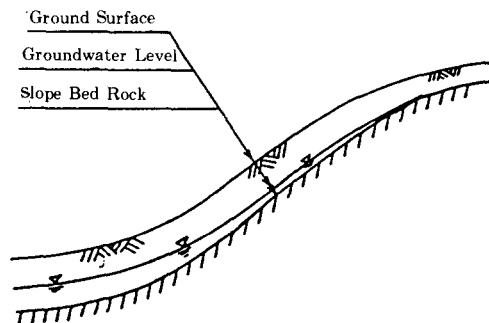


그림 2. 산사면에서의 전형적인 지하수 흐름

침투 모델(infiltration model)은 비포화대에서 포화대로 유입되는 강우의 부분을 구하는 모델로서 abcd 모델중 비포화대 흐름을 나타내는 부분을 이용하였으며, abcd 모델이 원래 월별 강우-유출 모델이기 때문에 시간별 지하수위를 예측할 수 있도록 수정하였다. 포화대 흐름 모델은 시간 지체 효과를 고려할 수 있는 선형 저수지 모델을 이용하였다.

각 모델에 대한 이론적인 면은 다음에 제시되어 있다.

### 2.1 침투 모델(Infiltration Model)

강우의 시작 초기에 산사면에서 포화대가 존재하지 않는다고 가정하면, 불투수층인 기반암 위의 토층이 얇은 경우에 강우의 시작으로 인하여 침윤선(wetting front)이 발생할 것이며 비포화대를 통하여 사면의 기반암까지 침투할 것이다. Eagleson과 Reddi는 비포화대를 지배하는 힘(predominant force)에 의해 세 zone으로 나눌 수 있다고 하였다.(그림 3)<sup>(7)(11)</sup> 토질수대(soil moisture zone)는 계속적인 강우나 강우기간 중간의 비강우 기간 동안 포화되기도 하고 비포화되기도 하는 현상을 반복하며 모세관력(capillary force)과 중력(gravity force)에 의해 지배된다. 그 아래의 중간수대(percolation zone)는 중력에 의해서 지배되며, 계속되는 강우에 의해 함수비가 증가하게 된다. 지하수위 바로 위의 모세관대(capillary zone)는 모세관력에 의해 지배된다. 따라서, 강우가 비포화대를 통과하여 침윤선이 기반암까지 도달하는 도중에 각 zone에서 저류되는 영향으로 인하여 지하수위 변동의 발생이 지체된다. 이것이 비포화대에서의 시간 지체 효과이며, Reddi Wu는 이것이 지하수위 예측에서 중요하게 고려되어야 할 점이라고 강조하였다.<sup>(12)</sup>

본 논문에서 제시하는 비포화대 흐름 모델은 Thomas에 의해서 개발된 월별 강우-유출 모델에 기본적인 것으로, 원래의 abcd 모델은 물평형개념(water balance concept)에 기초하고 있으며 4개의 모델변수(a, b, c, d)를 갖는 비

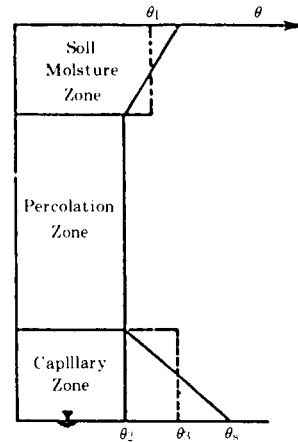


그림 3. 비포화대의 분포

교적 간단한 모델이다.<sup>(18)</sup> 모델변수 a와 b는 비포화대의 흐름과 관련되며, 변수 d는 포화대에서의 흐름을 고려하기 위한 것이다. 나머지 변수 c는 비포화대와 포화대 사이를 연결시켜 주는 역할을 한다. 이 연구에서는 비포화 흐름과 관련된 a, b, c만을 고려하며, 변수 d는 포화대에서의 시간 지체 효과를 고려할 수 없기 때문에 사용하지 않는다.

abcd 모델은 두 개의 상태변수,  $W_i$ 와  $Y_i$ , 를 가진다.

$$W_i = P_i + S_{i-1} \quad (2)$$

$$Y_i = S_i + E_i \quad (3)$$

여기서,  $P_i$ 와  $E_i$ 는 각각  $i$ 시간 동안의 강우량과 실제 증발산량(actual evapotranspiration)이며,  $S_{i-1}$ 과  $S_i$ 는 각각  $i-1$ 과  $i$ 시간 끝에서의 비포화대 저류량이다.

두 상태변수 사이의 관계는 비선형 함수의 식으로 정의된다.(그림 4)

$$Y_i(W_i) = \frac{W_i + b}{2a} - \left[ \left( \frac{W_i + b}{2a} \right)^2 - \frac{W_i b}{a} \right]^{0.5} \quad (4)$$

변수  $a$  ( $0 < a < 1$ )는 비포화대내의 토질이 완전히 포화되기 전에 발생하는 유출 성향을 나타내며, 1에 가까운  $a$ 의 값은 비포화대가 거의 모든 초기 강우를 저장하게 되어 완전히 포

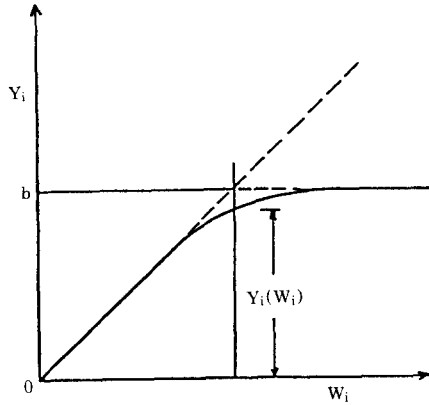


그림 4.  $W_i$ 와  $Y_i$ 의 관계

화된 다음에 유출 과정이 발생함을 의미한다. 변수  $b$ 는 토질함수비의 저장 한계를 나타내며, 지하수위의 변화에 따라 변하여야 하지만 원래의  $abcd$  모델에서는 평균값을 사용하여 나타낸다.  $b$ 값이 커짐에 따라 비포화대의 저장 능력이 증가하게 된다.

변수  $c$ 는 두 상태변수의 차를 단위 폭당 지하수 유입량,  $GR_i$ ,과 단위 폭당 직접 유출량,  $DR_i$ ,에 할당한다.

$$GR_i = c \{W_i - Y_i\} \quad (5)$$

$$DR_i = (1 - c) \{W_i - Y_i\} \quad (6)$$

식 (5)에 의해서 얻어진 단위 폭당 연직 방향의 지하수 유입량이 포화대 흐름으로 유입되어서 산사면을 통하여 아랫사면으로 흘러 내려가게 된다.

비포화대내에서의 저류량은 기상학적인 상태에 의하여 영향을 받는다. 시간별 강우-유출 모델을 고려할 경우에, 강우기간 동안의 차단 효과와 실제 증발산량이 무시될 수 있으며, 시간  $i$ 의 끝에서의 비포화대 저류량은  $Y_i$ 와 같게 된다. 강우기간 중간의 건조 상태(dry condition) 기간이나 비강우기간 동안의 실제 증발산량은 증발접시계수와 증발접시를 이용하여 구한 증발량의 곱으로 계산되는 잠재 증발산량과 같게 놓을 수 있다.

또한, 이 기간의 직접 유출(direct runoff)은 무시할 수 있기 때문에  $c=1$ 의 값을 갖는다고 볼 수 있다.

비포화대에서의 저류량은 기상학적인 상태 뿐만아니라 지하수위 변동으로 인한 영향을 받는다. 원래의  $abcd$  모델은 변수  $b$ 에 대하여 평균값을 사용하기 때문에 지하수위 변동 효과를 고려해 줄 수 없다. 따라서, 전시간 단계에서의 지하수위 변동량을 지하수 유입량에 곱해줌으로써 지하수위의 변동 효과를 고려해 주어야 하며, 이인모 등에 의해서 연구되었던 Sloan등과 Reddi의 비포화대 모델들도 역시 전 시간 단계에서의 지하수위를 이용하여 현재 시간에서의 평균체적함수비를 구하도록 되어 있다.<sup>(3)</sup> 위의 사항을 고려한 수정된  $abcd$  비포화대 흐름 모델로부터 시간당 지하수 유입량을 구하는 과정이 그림 5에 보여주고 있다.

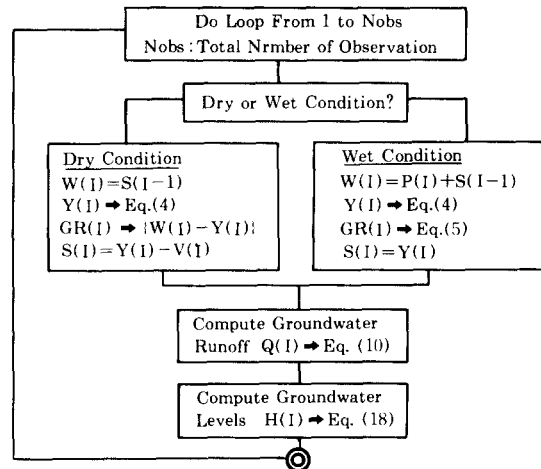


그림 5. 개발된 지하수 흐름 모델의 계산 과정

## 2.2 선형 저수지 모델(Linear Storage Reservoir Model, LSRM)

선형 저수지 모델은 수문 분야에서 유역의 홍수 추적을 위하여 주로 사용하는 모델로서, 이 모델은 두 가지의 가정을 가진다. 첫째는 포화대에서 저류량,  $SS$ ,와 유출량,  $0$ , 사이에 선형

관계를 갖는다고 가정하여 다음 식으로 나타낸다.

$$SS = K \times O \quad (7)$$

여기서,  $K$ 는 저류 상수(storage coefficient)이다.

둘째는 어떤 하나의 유역이 각각 식 (7)의 관계를 가지는  $n$ 개의 연속적으로 배열되어 있는 저수지들로 구성되어 있다고 이상화시킨다. (그림 6)

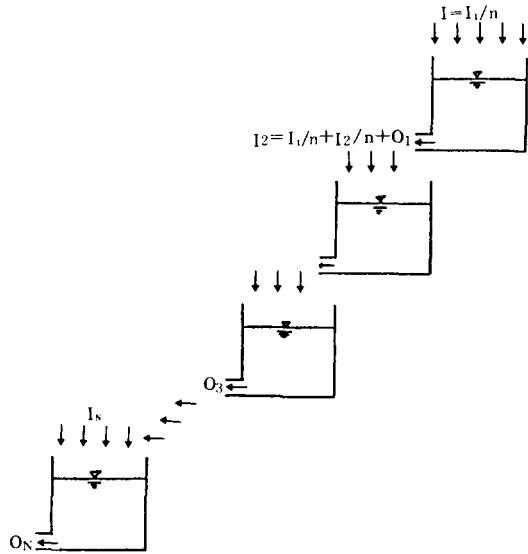


그림 6.  $n$ 개의 연속적인 LSRM

위의 가정들을 사용하여 전체의 유역이 하나의 선형 저수지로 이루어져 있다고 생각하면, 물평형 방정식은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dSS}{dt} = I - O \quad (8)$$

여기서,  $I$ 는 포화대로의 유입량이며, 식 (5)를 이용하여 구한 지하수 유입량과 유역의 전체 면적을 곱한 값이다.

식 (7)을 (8)에 대입하면 다음의 일차 편미분 방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{dO}{dt} + \frac{1}{K}O = \frac{1}{K}I \quad (9)$$

식 (9)의 해는 시간간격,  $\Delta t$ 에 대하여 다음

식과 같다.

$$O^{(1)} = O^{(0)} \exp\left[-\frac{\Delta t}{K}\right] + \frac{I}{K} \Delta t \quad (10)$$

여기서, 윗첨자 0과 1은 각각 시간간격의 시작과 끝을 나타낸다. 따라서, 식 (10)으로 부터 한 개의 저수지로 이루어진 유역의 유출량을 구할 수 있다.

전체의 유역이 두 개의 저수지로 이루어진 경우에는 첫번째 저수지에 대하여 유출량을 구하고, 지하수 유입량에 대한 시간 지체를 고려하여 두번째 저수지의 유출량을 구한다.

첫번째 저수지에 대하여 식 (8), (9)는 다음과 같다.

$$\frac{dSS_1}{dt} = I_1 - O_1 \quad (11)$$

$$\frac{dO_1}{dt} + \frac{1}{K_1}O_1 = \frac{I_1}{K_1} \quad (12)$$

여기서,  $I_1$ 은 식 (5)로부터 구한 첫번째 저수지의 강우에 대한 지하수 유입량과 첫번째 저수지가 차지하는 면적을 곱한 값이며,  $K_1$ 과  $O_1$ 은 각각 첫번째 저수지에서의 저류상수와 유출량이다.

첫번째 저수지의 유출량은 식 (12)를 적분하여 구할 수 있다.

$$O_1^{(1)} = O_1^{(0)} \exp\left[-\frac{\Delta t}{K_1}\right] + \frac{I_1}{K_1} \Delta t \quad (13)$$

두번째 저수지에 대한 유입량은 첫번째 저수지의 유출량과 두번째 저수지의 강우에 대한 지하수 유입량과 면적을 곱한 값의 합으로 구한다.

$$K_2 \frac{dO_2}{dt} = I_2 - O_2 \quad (14)$$

따라서, 두번째 저수지에 대한 유출량은 다음과 같다.

$$O_2^{(2)} = O_2^{(1)} \exp\left[-\frac{\Delta t}{K_2}\right] + \frac{I_2}{K_2} \Delta t \quad (15)$$

여기서, 윗첨자 1과 2는 각각 시간간격,  $\Delta t$ , 동안에 유출의 시간 지체를 고려한 시작과 끝을 나타낸다.

만약 전체의 유역이  $n$ 개의 연속적으로 배열

되어 있는 저수지들로 이루어져 있다고 하면 저수지 수만큼의 포화대에서의 지하수 흐름에 대한 시간 지체 효과를 고려할 수 있다. 산사면의 전체 길이가 짧은 경우에는 Sloan등이 가정한 것과 같이 산사면을 하나의 control volume 또는 하나의 저수지로 간주하여 지하수위를 구할 수 있다.<sup>(16)</sup> 그러나, 사면이 긴 경우에는 사면의 비균질성을 고려하여 n개의 균질한 선형 저수지 개념을 사용하는 것이 더 바람직하다.

본 논문에서는 산사면의 전체 길이가 짧기 때문에 하나의 저수지로 가정하고 식 (10)을 이용하여 지하수 유출량을 구하였다.

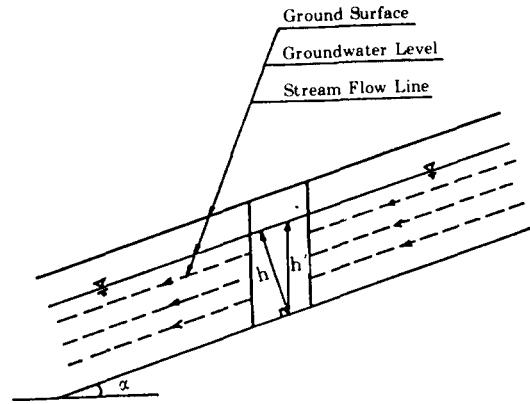


그림 7. 지하수위와 지하수 유출량의 관계

### 2.3 지하수 흐름 모델(Groundwater Flow Model)

산사면에서의 전반적인 지하수 흐름을 모델화하기 위해서는 앞에서 언급한 침투모델로부터 식 (5)를 이용하여 지하수 유입량을 구하고, 선형 저수지 모델로부터 식 (10) 또는 (15)를 이용하여 지하수 유출량을 구하여야 한다. 그러나, 우리가 관측하는 것은 지하수위이므로, 지하수 유출량과 지하수위 사이의 관계가 유도되어야 한다. 이 관계는 다음의 가정들을 이용하여 유도한다.

- ① 관측공에서 포화대의 흐름은 사면의 불투수층인 기반암의 경사와 평행하다. → Dupuit-Forchheimer 가정
- ② 관측공에서 단위 폭(1m)당의 지하수 유출량을 계산한다.
- ③ 지하수 유출량의 증감은 관측된 지하수위의 증감에 비례한다.

위의 가정들을 이용하여 단위 폭당 지하수 유출량의 증감,  $\Delta q$ ,는 다음과 같이 나타낼 수 있다.(그림 7)

$$\Delta q = \Delta a v = (\Delta h \times l) (K_s \times \sin \alpha) \quad (16)$$

$$\Delta h = \Delta h' \times \cos \alpha \quad (17)$$

여기서,  $h$ 는 사면의 기반암에 대하여 직각인 지하수위이고,  $h'$ 는 관측된 지하수위이며,  $K_s$ 는 포화투수계수를 나타낸다.

그러므로, 어떤 시간  $i$ 에서의 지하수위는 다

음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_i' = h_{i-1}' + \frac{\Delta q}{\cos \alpha \sin \alpha K_s} \quad (18)$$

### 3. 매개변수분석(Parameter Estimation)

대부분의 개념적인 지하수 흐름 모델은 자유 모델변수들을 가지며, 이들은 관측된 유입-유출량의 자료들을 이용하여 구할 수 있다. 본 논문에서 개발된 지하수 흐름 모델은 네 개의 모델변수 -  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , 그리고  $K$  -를 갖고 있으며, 이들에 대한 매개변수분석을 위하여 Bard 알고리즘을 이용하였다.<sup>(8)</sup>

모델변수,  $x$ ,와 독립변수,  $p$ ,를 갖는 개념적인 지하수 흐름 모델은 다음과 같은 비선형의 함수식으로 나타낼 수 있다.

$$Y = F(x, p) \quad (19)$$

식 (19)를 기본으로 하여 최적 변수를 구하는 Bard 알고리즘의 과정을 아래에 설명하였다.

- (1) 먼저 Bard 알고리즘은 비선형 함수식을 Gauss-Newton 방법과 Taylor series expansion을 이용하여 선형화 시킨다. 식 (19)를 Taylor series에 의해 확장하여 첫번째와 일차 도함수를 포함하는 두 번째 식만을 선택하면 다음과 같이 선형화 시킬 수 있다.

$$Y_i = Y_i^* + \left[ \frac{\partial Y_i}{\partial X} \right]^* (x - x^*) \quad (20)$$

(2) Bard 알고리즘은 관측값과 계산값의 차의 제곱에 대한 합의 값을 최소화 하도록 목적함수를 정한다. 이 목적함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{최소화 } S = \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_i^*)^2 \quad (21)$$

여기서, N은 관측된 수이며,  $Y_i$ 는 관측값을 나타낸다.

(3) S를 최소화하기 위해 식 (20)을 (21)에 대입하여 각 모델변수에 대한 목적함수의 편미분이 0이 되도록 한다.

$$\frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad (22)$$

식 (22)의 결과는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[ \frac{\partial Y_i}{\partial X} \right]^* (Y_i - Y_i^*) = \left[ \frac{\partial Y_i}{\partial X} \right]^* (X - X^*) \quad (23)$$

(4) 식 (23)으로부터  $(x - x^*)$ 을 구할 수 있으며, x의 값에 대하여 수렴이 이루어지면  $(x - x^*)$ 와 S는 0에 가까운 값을 갖게 되며 최적 변수는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$x = x^* + \Delta x \quad (24)$$

여기서,  $\Delta x$ 는  $(x - x^*)$ 이다.

만약, 수렴이 이루어지지 않았다면,  $\Delta x$ 에 의해 구한 x값을  $x^*$ 로 대체하여 다시 위의 과정을 반복한다.

위의 과정을 나타내는 Computer Logic Diagram이 그림 8에 보여주고 있다.

#### 4. 적용 예제

본 논문에서 개발된 지하수위 예측 모델을 적용하기 위하여 서울 구로구 시흥동 지역에 위치한 야산을 선택하였다. 이 지역은 과거에 빈번한 작은 규모의 산사태가 발생했으며, 특히 '77년과 '87년에는 대규모 산사태가 발생하여 많은 인명 손실과 재산 피해를 남기도 하였다.(그림 9) 조천환등이 산사태 발생 원인 규

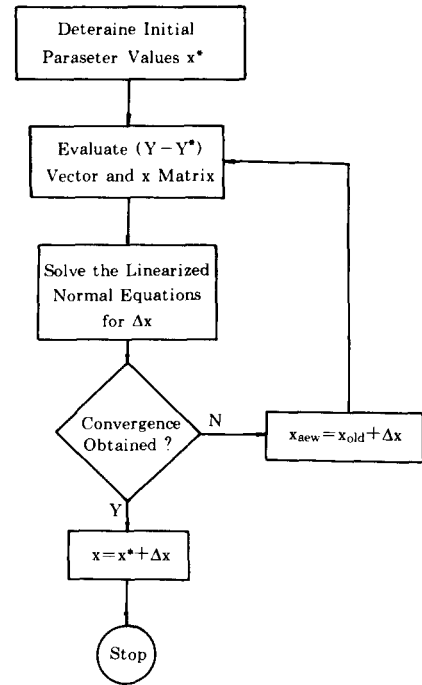


그림 8. Bard 알고리즘의 Computer Logic Diagram

명의 일환으로 이 지역에서 시간당 지하수위를 관측하였으며, 실내 및 현장 실험을 실시하였다.<sup>(4)</sup> '89년 6월부터 11월 사이에 우물, WB,로부터 관측한 지하수위 중에서, 7월 25일과 31일 사이에 발생한 강우와 8월 27일과 30일 사이에 발생한 강우에 대한 지하수위만을 이용하였으며, 시간당 강우강도와 평균 접시 증발량은 기상청에서 발간하는 보고서를 이용하였다.<sup>(6)</sup> 또한, 조천환등이 수행한 실내 및 현장 실험의 결과를 이용하였다.

##### 4.1 불확실한 상수들의 결정

토층의 두께, 사면의 경사각, 포화투수계수 및 잠재 증발산량등의 값은 시간적, 공간적인 의미에서의 평균값을 사용하며 이들을 산정한 값은 다음과 같다.

###### ① 토층의 두께(D)

현장 지역에서의 토층은 0.45~1.00m의 층



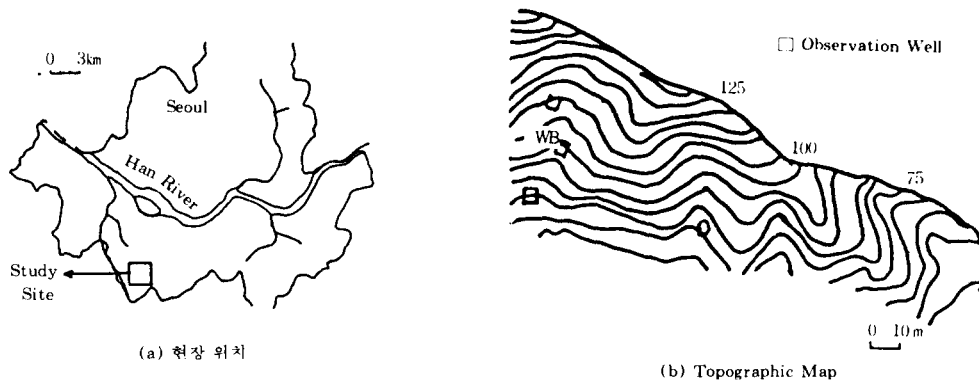


그림 9. 시흥동 야산의 현장 위치와 topographic map

적토층과 그 아래 높은 풍화 정도를 가진 0.5~1.5m 정도의 풍화토층으로 이루어져 있었으며, 통일분류법에 의해서 SM-SC로 판명되었다. 풍화토층 아래에는 불투수층의 기반암이 존재하였다. 지하수위 위의 초기 비포화대의 두께는 첫번째 강우에 대하여 2.06m, 두번째 강우에 대하여 1.95m 였다.

② 사면의 경사각( $\alpha$ )

현장 지역에서의 산사면은 약 35° 내외로 가파르게 경사져 있었다.

③ 포화투수계수( $K_s$ )

포화투수계수는 현장 변수위 실험(in-situ falling head test)에 의해서 조사하였으며,  $1.5 \times 10^{-5} - 7.0 \times 10^{-5}$  cm/sec의 범위를 얻었다. 평균적으로  $3.62 \times 10^{-5}$  cm/sec의 값이 이 예제에서 입력값으로 사용되었다.

④ 잠재 증발산량( $V_i$ )

일별 접시 증발량은 관악산 관측소로부터 관측된 자료를 이용하였다.<sup>(11)</sup> 7월과 8월 사이에 건조기간 동안의 총 접시 증발량은 34일에 대하여 111.7mm/day였다. 증발 접시 계수값을 0.8이라 하면, 시간적, 공간적인 시간당 잠재 증발산량의 평균값은 0.011cm/hr이며, 이 논문에서는 시간별 잠재 증발산량 대신 강우 발생이 없었던 모든 시간에 대하여 이 평균값을 사용하였다.

4.2 모델 변수 K의 초기값 설정

선형 저수지 모델에서의 저류상수, K는 Sloan등에 의해서 개발된 Kinematic Storage Model(KSM)로부터 초기값을 설정할 수 있다. 어떤 평면 무한 사면에 대하여 (그림 10), KSM은 포화대에서의 지하수 저류량과 유출량을 다음과 같이 표현한다.<sup>(16)</sup>

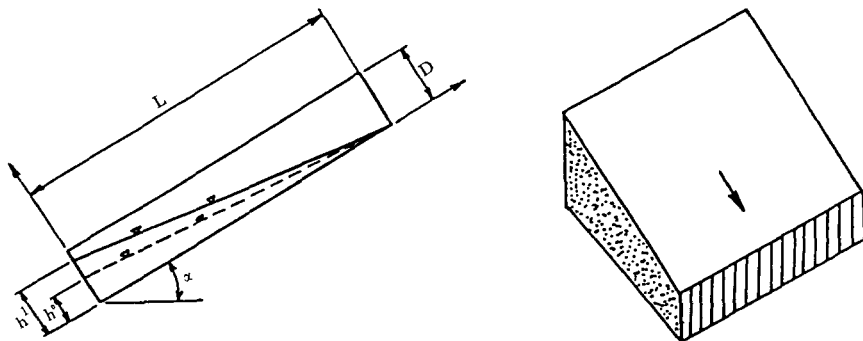


그림 10. Kinematic Storage Model

$$S = \frac{h_0 \theta_d L}{2} \quad (25)$$

$$q = h_0 K_s \sin \alpha \quad (26)$$

여기서,  $\theta_d$ 는 토질의 배수 가능한 간극률 (drainable porosity)이며, L은 사면의 전체 길이이다.

위의 식 (25), (26)으로부터 저류 상수는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$K = \frac{\theta_d L}{2 K_s \sin \alpha} \quad (27)$$

이 현장 지역에서 배수 가능한 간극률을 0.3으로 간주한다면, 저류 상수는 7224.23의 평균 값을 갖게 된다.

이와 같은 초기치 설정 방법은 산사면 전체를 하나의 control volume이나 하나의 저수지로 간주하지 못하는 경우에도 사용할 수 있다. 만약, 어떤 산사면에서의 포화투수계수의 값이나 배수 가능한 간극률, 또는 사면의 경사각등이 다른 사면 부분에 비해서 현저한 변화를 가졌을 경우에는 산사면을 n개의 저수지로 나누어서 n개의 균질한 저수지에 대하여 각각 식 (27)로부터 초기 저류상수값을 산정할 수 있다.

### 4.3 적용 결과

#### 4.3.1 LSRM으로부터의 지하수 유입량

식 (10)과 (18)로부터 K의 값이 매우 큰 경우에 관측된 지하수위를 이용하여 지하수 유입량의 변화를 계산할 수 있다.

$$GR_i = \frac{\Delta h' K_s \sin \alpha \cos \alpha K}{AREA} \quad (28)$$

식 (28)로부터 구한 지하수 유입량의 변화가 그림 21과 22에 가는 점선으로 보여주고 있다. 그림에서 나타나는 음의 값을 갖는 지하수 유입량은 증발산등에 의한 효과로 생각되며, 최대 강우 강도에 대하여 약 55% 정도의 최대 지하수 유입량이 발생함을 알 수 있다.

#### 4.3.2 비포화대에서의 체적함수비 변화

비포화대에서의 체적함수비는 물평형개념으

로부터 구할 수 있다. 식 (28)에서 구한 지하수 유입량과 시간당 강우강도를 이용한다면, 비포화대에서의 저류량의 변화는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = (P_i - GR_i - E_i) \quad (29)$$

여기서,

$$\Delta S = \Delta[\theta (D - h')] ]$$

$\theta$ : 비포화대에서의 평균체적함수비

식 (29)로부터 비포화대에서의 저류량은 토층의 두께 뿐만아니라 지하수위의 변동에 의해서도 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. i시간에서의 평균체적함수비는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\theta_i = \frac{\theta_{i,1} (D - h'_{i,1}) + (P_i - GR_i - E_i)}{(D - h'_{i,1})} \quad (30)$$

그림 11과 12는 초기 함수비를 0.0, 0.1, 0.2, 0.3으로 변화시키면서 지하수위의 변동을 고려하여 구한 체적함수비의 변동을 보여주고 있다. 초기 함수비가 클 수록 변동이 심함을 알 수 있다. 즉, 초기 함수비가 클 수록 지하수위의 변동과 더불어 비포화대에서의 체적함수비도 증가하므로, 강우에 대하여 산사면이 더 위험해짐을 알 수 있다.

그림 13과 14는 지하수위 변동을 고려하지 않고 초기 비포화대 토층의 깊이를 고정시켜 구한 체적함수비의 변동이다. 가는 실선은 전체 토층의 두께(D)를 고려한 경우이고, 굵은

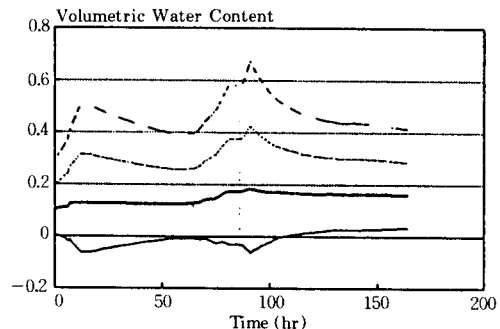


그림 11. 체적함수비의 변화(첫번째 강우)

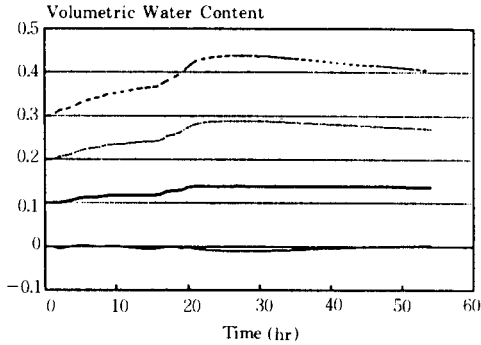


그림 12. 체적함수비의 변화(두번째 강우)

실선은 전체 토층 두께의 반( $D/2$ )을 고려한 경우이다. 그림 11, 12와 비교할 때 현격한 차이가 발생함을 알 수 있다. 첫번째 강우에 대하여, 초기에는 오히려 체적 함수비가 감소함을 보여주고 있는데(그림 13), 이는 그림 21에서 알 수 있듯이 초기 강우 강도에 비하여 큰 지하수 유입량의 발생에서 기인한 것으로 생각된

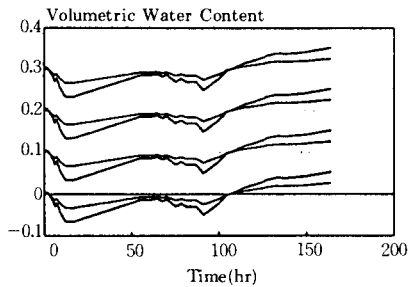


그림 13. 체적함수비의 변화(첫번째 강우)

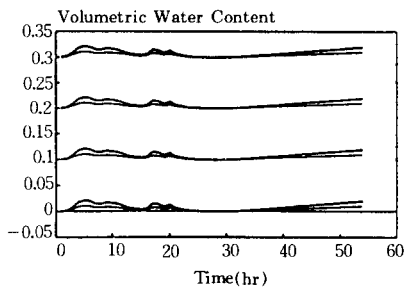
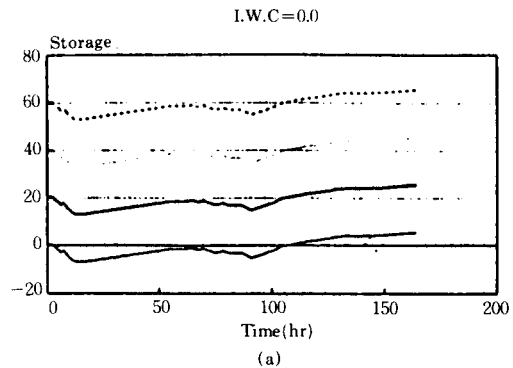


그림 14. 체적함수비의 변화(두번째 강우)

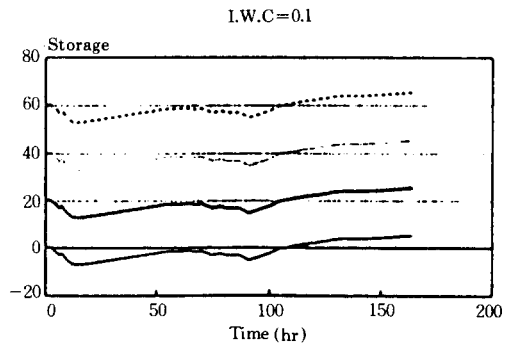
다. 그러나, 첫번째 강우와 두번째 강우는 모두 작은 체적함수비의 변동을 갖는다.

Thomas abcd 모델의 비포화대 흐름 모델에서 비포화대내에서의 저류량,  $S$ ,는 평균체적함수비와 지하수위 변동의 곱으로 나타낼 수 있다. 따라서, abcd 모델이 지하수위의 변동에 따른 비포화대에서의 체적함수비의 변화를 고려할 수 있도록 수정하여야 한다. 본 논문에서는 전시간 단계의 지하수위 변동량을 지하수 유입량에 곱해줌으로써 이 영향을 고려하였다.

그림 15와 16은 지하수위의 변동을 고려하여  $S_0$ 를 0에서 60으로 변화시키면서 구한 저류량의 변화이다. 초기값의 변화에 상관 없이 곡선의 모양이 거의 비슷함을 볼 수 있다. 즉, 저류량의 초기값에 대한 영향을 고려하지 않아도 됨을 알 수 있다.



(a)



(b)

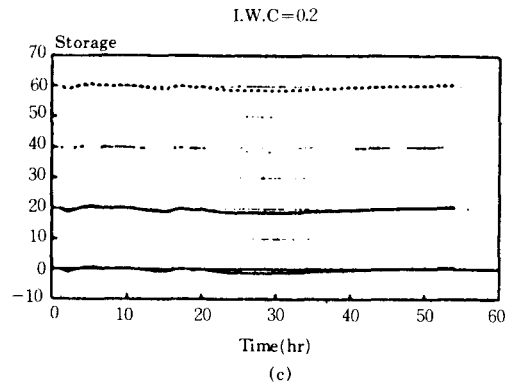
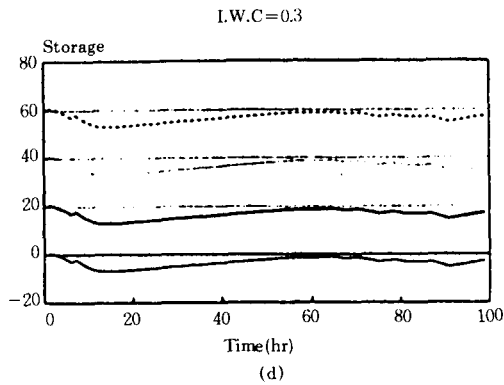
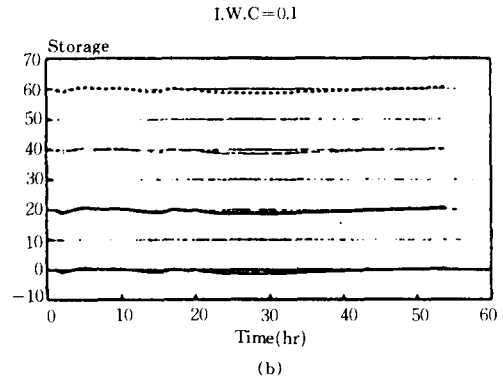
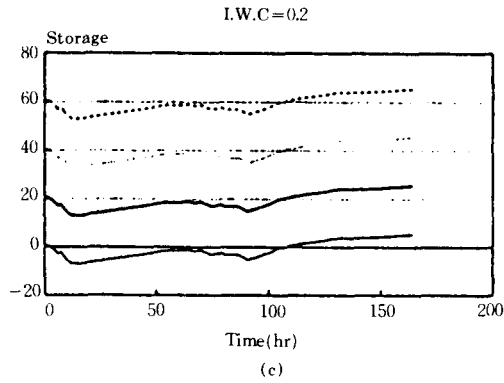


그림 15. 저류량의 변화(첫번째 경우)

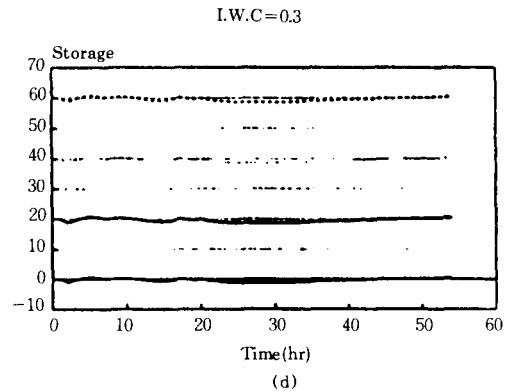
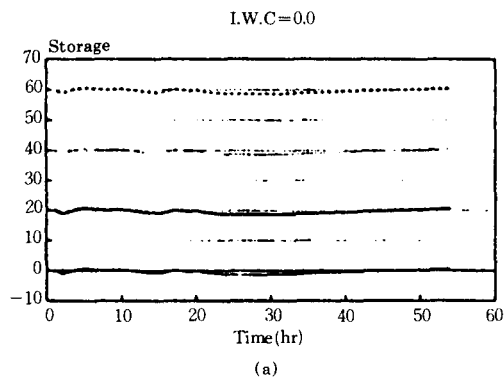


그림 16. 저류량의 변화(두번째 경우)

#### 4.3.3. 매개변수분석의 결과

이 논문에서 개발된 지하수 흐름 모델을 가지고 Bard 알고리즘을 적용하여 매개변수분석

을 수행하였다. 먼저, 수정된 abcd 모델의 변수 a, b, c의 변화가 목적함수의 값에 어떤 영향을 미치는지 알기 위해 각 변수값들을 변화시키면

서 목적함수값을 구하였다.(그림 17, 18) 그 결과 변수 a의 값에 따라서 상당한 변화가 발생할 수 있다. 이것은 매개변수분석에서 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 변수 a의 잘못된 초기 값의 가정이 다른 변수들의 최적값에도 영향을 미쳐 매개변수분석으로 구한 최적 변수값들이 잘못된 값들이거나 심지어는 최적 값을 구할 수조차 없는 경우도 발생할 수 있다. 이를 고려하기 위해 Bard 알고리즘에서는 변수 a값의 범위를 0.99-0.999로 제약하였다.

이와 더불어 초기값을 0.995로 하였는데, 이것은 그림 17과 18의 결과를 고려한 것은 물론 Thomas등이 미국의 Massachusetts와 Connecticut의 40개 지역에 대하여 abcd 모델을 적용한 결과, 식생으로 우거진 지역에 대하여 a의 값이 0.995 이상으로 평가되었다는 점을 고려한 것이다.<sup>11)</sup> 두 경우 사상에 대하여 사용한 초기값과 Bard 알고리즘의 적용 결과로 얻어진 모델변수들의 값이 표 1에 나타나 있다.

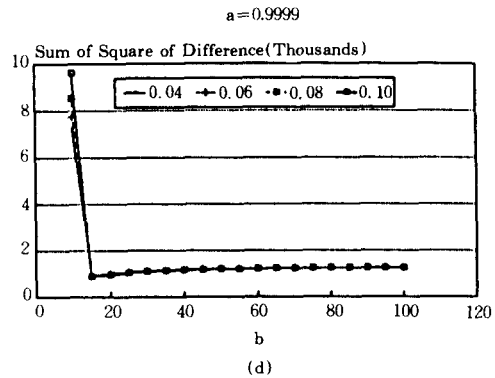
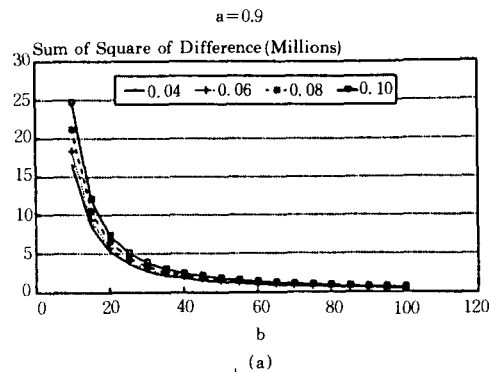
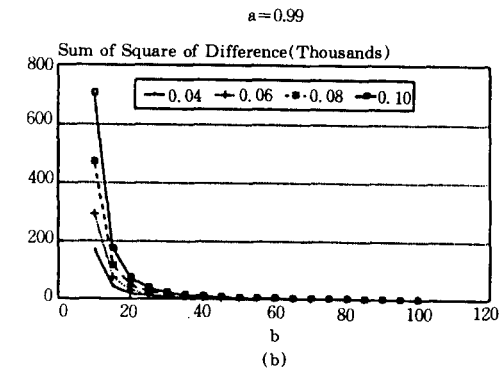
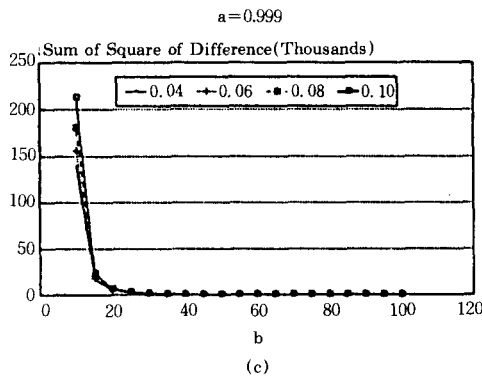
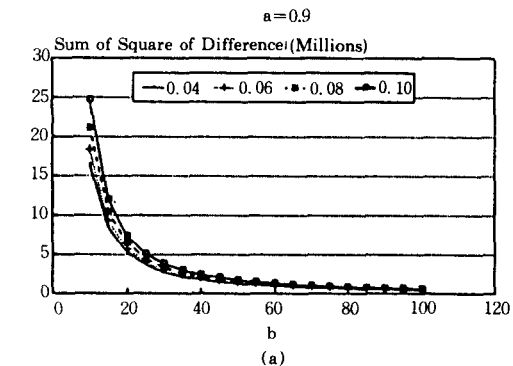
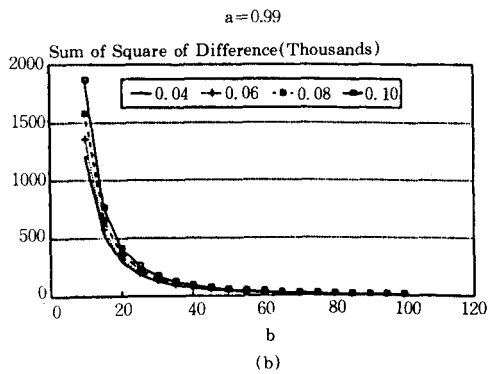


그림 17. a, b, c의 변화에 따른 목적함수값의 변화(첫번째 경우)



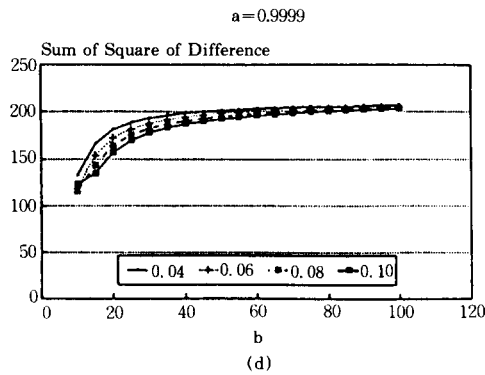
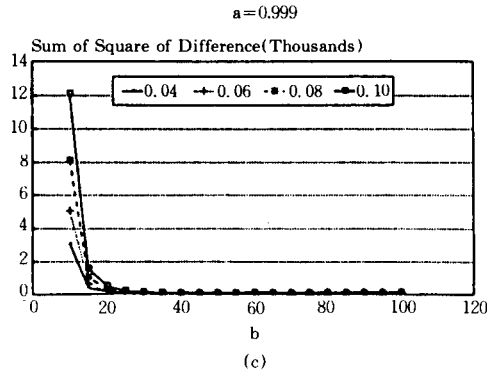


그림 18. a, b, c의 변화에 따른 목적함수값의 변화(두번째 경우)

표 1. 모델변수들의 초기값과 최적값

모델변수	초기값	첫번째 경우	두번째 경우	평균값
a	0.995	0.9925	0.9931	0.993
b	40.0	40.737	41.661	41.2
c	0.9	0.9641	0.9445	0.945
K	7224.23	7286.07	7399.60	7342.8
$\Sigma(Y-Y)^2$		1382.784	418.72	

매개변수분석 결과 얻어진 각 모델 변수들의 값을 평균하여, 이 평균값을 지하수 흐름 모델에 적용하여 지하수위를 구한 결과가 그림 19와 20에 보여주고 있다. 그림 21과 22는 평균값을 이용하여 구한 지하수 유입량 및 LSRM을 적용하여 구한 지하수 유입량을 서로 비교하여 보여주고 있다. 이들 그림으로부터 개발된 지

하수 흐름 모델이 지하수위를 적절하게 예측해 주고 있음을 볼 수 있다.

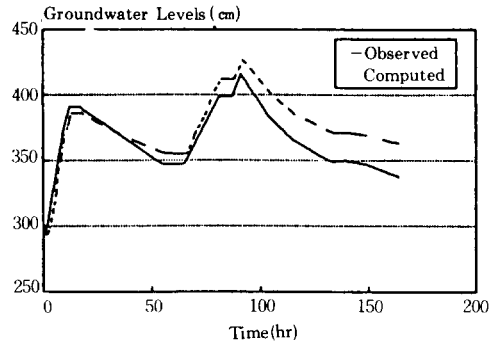


그림 19. 모델변수의 평균값을 이용한 지하수위(첫번째 경우)

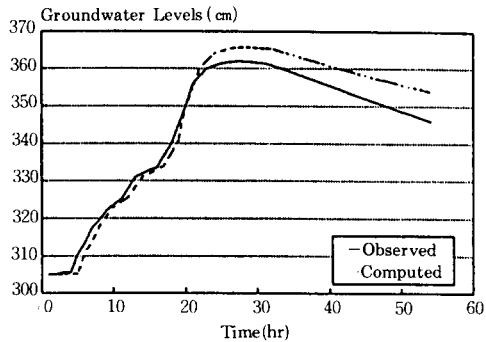


그림 20. 모델변수의 평균값을 이용한 지하수위(두번째 경우)

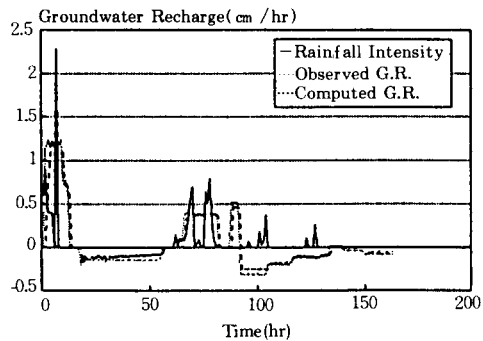


그림 21. 모델변수의 평균값을 이용한 지하수 유입량(첫번째 경우)

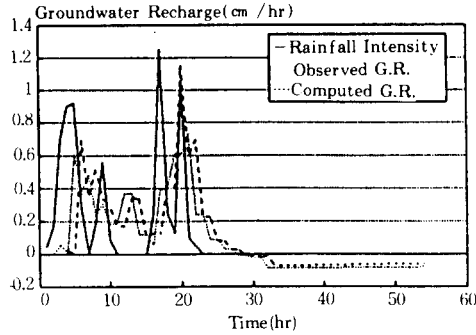


그림 22. 모델변수의 평균값을 이용한  
지하수 유입량(첫번째 강우)

## 5. 결 론

본 논문에서는 산사태 위험도를 추정하기 위하여 산사면에서의 지하수위를 예측하기 위한 물리적인 의미에 기초를 둔 Lumped-parameter 간극수압 예측 모델을 개발하였다. 또한, 개발된 모델의 현장 적용 가능성을 입증하기 위하여 실제로 대규모 산사태가 발생했던 현장 지역의 시간당 강우강도와 지하수위를 이용하여 매개변수분석 연구를 수행하였다. 이 연구로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 원래의 월별 강우-유출 모델인 Thomas abcd 모델은 변수 b에 대하여 평균값을 사용하기 때문에 시간별 지하수위의 변동으로 인한 평균체적함수비의 영향을 고려해 줄 수 없었다. 따라서, 본 연구에서는 전시간 단계의 지하수위 변동량을 지하수 유입량에 곱해줌으로써 지하수위의 변동으로 인한 평균체적함수비의 변화를 고려해 줄 수 있도록 수정된 모델로 제시하였다.

(2) 포화대 흐름 모델은 산사면의 전체 길이로 인한 시간 지체 효과를 고려해 주어야 하며, 선형 저수지 모델은 산사면을 n개의 균질한 저수지로 분리함으로써 사면의 공간적 변화로 인한 시간 지체 효과를 고려해 줄 수 있을 것으로 생각된다. 포화대 흐름 모델로부터 초기 저류상수, K,를 설정할 때에 불확실성이 큰 포화

투수계수, 토질의 배수 가능한 간극률등과 같은 parameter들을 고려해 주기 때문에 K의 매개변수분석을 통하여 이들 parameter들의 불확실성을 조합한 최적값을 구할 수 있다.

(3) 산사태 발생 현장 지역에 적용한 결과, 본 연구에서 개발된 모델이 관측된 지하수위를 비교적 잘 예측해 주고 있어 모델의 타당성을 입증하였으며, 몇개의 현장에 더 적용하여 추가적인 타당성이 밝혀지면 차후에 산사태 발생 위험도 추정을 위한 예측체제(forecast system)에 사용할 수 있을 것이다.

(4) 최적 매개변수분석을 통하여 적용 현장에 대한 자유모델변수들의 최적값을 구할 수 있으며, 특히 변수 a의 변화에 대하여 목적함수값의 변화가 심하므로 이에 대한 예측이 가장 중요한 요소라고 결론 지을 수 있다.

본 연구에서는 개발된 지하수위 예측 모델의 현장 적용 가능성을 입증하였기 때문에, Bard 알고리즘에서의 목적함수는 단순히 관측값과 계산값만을 이용하였다. 다시말하여, 매개변수 자체의 변화에 대한 영향을 고려해주지 못하였다. 따라서, 앞으로의 연구에서는 관측값과 계산값의 영향 뿐만아니라 각각의 자유모델변수들의 변화에 대한 영향을 고려할 수 있는 목적함수를 선택하여 더욱 정교한 확률론적인 매개변수분석 연구를 수행하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 (과제번호: 911-1306-015-2)의 기초 연구비 지원에 의하여 수행된 것으로, 이에 대하여 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 이영남(1991). "산사태," 대한토질공학회지, 제7권 제1호, pp.105-113.
2. 이인모(1987). "산사태 위험도 추정을 위한 지하수위 변동의 추계론적 수치해석," 대한토질공학회지, 제3권 제4호, pp.41-54.

3. 이인모·임충모·박경호(1991). "산사태 위험도 추정을 위한 간극수압 예측에 관한 연구(I)-지하수 유입량의 비교 연구," 대한 토목학회 학술발표회 개요집.
4. 조천환·나경준·구호본(1989). "사면의 안전진단 및 보호공법" 전기연 89-GE-111, 333pp.
5. 홍원표(1991). "우리나라의 자연지해상황통계," 대한토질공학회지, 제 7권 제 1호, pp.93-99
6. — (1989). "기상 월보," 기상청.
7. Eagleson, P.S.(1978). "Climate, soil vegetation, parts 3 and 4," Water Resour. Res., 14(5), pp.731-739, 741-748.
8. Kuester, J.L. and Mize, J.H.(1973). "Optimization techniques with Fortran," McGraw-Hill, Inc., 500pp.
9. O'Loughlin, C.L.(1974). "The effect of timber removal on the stability of forest soils," J.Hydro. N.Z., 13(2), pp.121-123
10. Rajaram, H. and Georgakakos, K.P.(1989). "Recursive parameter estimation of hydrological models," Water Resour. Res., 25(2), pp.281-294
11. Reddi, L.N.(1988). "Probabilistic analysis of groundwater levels in hillside slopes," Ph.D. Dissertation, The Ohio State University, Columbus, OH.
12. Reddi, L.N. and Wu, T.H.(1991). "Probabilistic analysis of ground-water levels in hillside slopes," J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 117(6), pp.872-890
13. Sidle, R.C., Pearce, A.J., and O'Loughlin, C.L. (1985). "Hillslope stability and land use," American Geophysical Union, Water Resources Monograph:11, 140pp.
14. Sidle, R.C. and D.N. Swanston(1982). "Analysis of a small debris slide in coastal alaska," Can. Geotech. J., 19, pp.167-174
15. Sloan, P.G. and Moore, I.D.(1984). "Modeling subsurface storm flow on steeply sloping forested watersheds," Water Resour. Res., 20(12), pp.1815-1822.
16. Sloan, P.G., I.D. Moore, G.B. Coltharp, and J. D. Eigel(1983). "Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds," Rep.142, Water Resour. Inst., Univ. of Ky., Lexington, Ky., 167pp.
17. Swanston, D.N.(1974). "Slope stability problems associated with timber harvestion in mountainous regions of the western United States," Gen. Tech. Rep. PNW-21, For. Serv., U.S. Dept. of Agric., Portland, Oreg., 14pp.
18. Thomas, H.A., Jr.(1981). "Improved methods for national water assessment," Report to WRC(WR 15249270), U.S. Water Resour. Council, Washington, D.C.
19. Thomas, H.A., Jr., Marin, C.M., Brown, M.J., and Fiering, M.B.(1983). "Methodology for water resources assessment," Report to U.S. Geological Survey, Rep. NTIS 84-124163, Natl. Tech. Info. Serv., springfield, Va.
20. Wu, T.H., W.P. Mckinnel, and D.N. Swanston. (1979). "Strength of tree roots and landslides of Prince of Wales Island, Alaska," Can. Geotech. J., 16(1), pp.19-33.

(접수일자 1991.11. 2)