

(기술정보)

## 이동수위가 지하수 함양 추정에 미치는 영향

李光烈\*

### 서론

지하수의 흐름은 강우량의 변화에 영향을 받으며 강우의 영향을 고려하여 Recharge를 계산해야 하는 것은 지하수의 거동을 연구하는데 있어서 기본이 되는 요소이다.

지하수면위 부분(Unsaturated Zone)에서의 토양의 특성(함수비, 공극비, 특수계수 등)은 강우량에 의해 많은 영향을 받으며, Recharge와 강우량과는 상호관계가 있는 것은 분명한 사실이다.

현재까지 사용되고 있는 대부분의 포화상태 혹은 Flow Model로부터 Recharge가 input data로써 요구되거나 그렇지 않으면 강우를 나타내는 어떤 함수로 가정하여 쓰고 있다.

한편, 포화영역(Saturated Zone)과 불포화영역(Unsaturated Zone)을 복합한 Model[3]을 사용함으로써 Unsaturated Zone에서 Saturated Zone으로 스며드는 Recharge를 계산할 수도 있다. 수치해석(Numerical Analysis)으로 풀이한 Unsaturated-Saturated Flow Model이 복잡하고 정밀하기는 하나, 이 Model은 사용하기에 번거로우며 그리고 입력자료들(Input Parameters)의 정확도에 의해 이 Model의 결과에 대한 정밀도가 결정된다.

따라서 Recharge계산에 영향을 끼치는 수리학적 계수를 재시험하거나 또는 Recharge를 계산하기 위한 간단한 방법을 모색해 보는 것도 유용한 연구가 될 것이다.

이 연구는 Simple Mass Balance Model의 적합성(Predictive Capability)를 연구하는데 그 목적을 두고 있다. 임의의 불포화상태의 영역(Unsaturated

Domains)를 가지고 Simple Mass Balance Model의 계산결과와 UNSAT 1(Numerical Model)의 결과를 비교해 보았는데 현재 쓰이고 있는 대부분의 불포화영역(Unsaturated Zone)에서의 수치해석 Model이 지하수위의 Fluctuation을 무시했기 때문에, 이번 연구에서는 Recharge의 계산에 있어서 Moving Water Table의 영향을 규명하는데 주안점을 두었다.

### 모형의 記述

#### 질량평형 모형

이 Model에 있어서의 가정은 첫째, 불포화영역(Unsaturated Zone) 전체는 하나의 Homogeneous한 층이며 둘째, Saturated Zone으로의 Recharge는 Unsaturated Zone에 저장된 물의 부피에 대한 함수로 나타내어진다는 것이다.

즉,

$$\gamma = K(\theta_u) \tag{1}$$

여기서  $\gamma$  = Saturated Zone으로 유입되는 Recharge Rate

$\theta_u$  = Unsaturated Zone에서의 평균체적 함수비

$K(\theta_u)$  = 임의의  $\theta_u$ 에서의 Unsaturated Hydraulic Conductivity

함수비  $\theta_u$ 는 Mass Balance Model에 의해 산출되는데 그식은,

$$\theta_{u2} = [\theta_{u1} V_u + A_u \Delta t(q-r)] / V_u \tag{2}$$

\*Ph.D., Associate Member of ASCE, Member of ASTM, IGS

Assistant Project Manager, PMK Consulting Engineers Inc., Union, NJ, U.S.A.

여기서  $V_u$ 는 Unsaturated Zone에서의 전체 Volume이며  $q$ 는 강수량, 첨자 1,2는 시간의 증가에 따른 시작과 끝을 의미한다. 마지막으로  $A_u$ 는 Unsaturated Zone의 수평단면이다. Mass Balance Model의 가정은 바로 강우의 중력에 의한 흐름이 매번 강우가 있을 적마다 일어난다는 것이다.

수치모형(UNSAT 1)

UNSAT 1[4]은 Hermitian finite element computer model을 사용하였으며, 이것은 Saturated-Unsaturated Zone에서 Non-Homogeneous한 흙의 1축 방향의 물의 거동을 Simulation할 수 있는 Program이다.

이 Model은 Saturated-Unsaturated medium에서의 수직방향의 흐름식을 나타내는 편미분 방정식을 수치해석(Numerical Analysis)방법으로 풀이하였다. 이 Model은 Newman과 Dirichlet Type의 Boundary Condition을 만족한다.

이 Model에 또다른 기능이 있는데 그것은 Unsaturated Zone에서 서로 다른 층(Layer)들의 Propertier가 자연스럽게 조금씩 변화하는 것도 Simulation할 수

있다. 보다 완전한 설명이나 Program, 그리고 그의 Solution을 원하는 독자는 Reference[4]를 참조하기 바란다.

모형의 적용

지금까지 설명된 Models들을 네가지 종류의 흙을 가지고 가상의 불포화토(Unsaturated Soils)에 적용했다. 그 Soil Profile은 수문학적 성질(Hydrologic Characteristics)에서 넓은 범위를 가지고 있다. 흙의 종류로는 모래, Sandy loam, Silty clay loam, City clay등이다. 여기서 사용된 흙들은 불포화상태의 영역이며 균질한 것으로 가정하고 Model에 적용하였다.

이 Model들을 적용하는데는, Moisture retention function( $h=f(\theta)$ )이나 함수비대 투수계수(Hydraulic Conductivity)와의 함수관계( $K=f(\theta)$ )에 대한 지식이 요구되는데 이러한 관계식으로는 몇가지가 실험식이 보고되어 있다. (Ref. [1], [2], [4], [5])

이 연구의 목적을 위하여 Campbell's Relationship이 사용되었으며 그것은 체적함수비(Volumetric Water Content)에 따른 투수계수(Hydraulic Conductivity)의

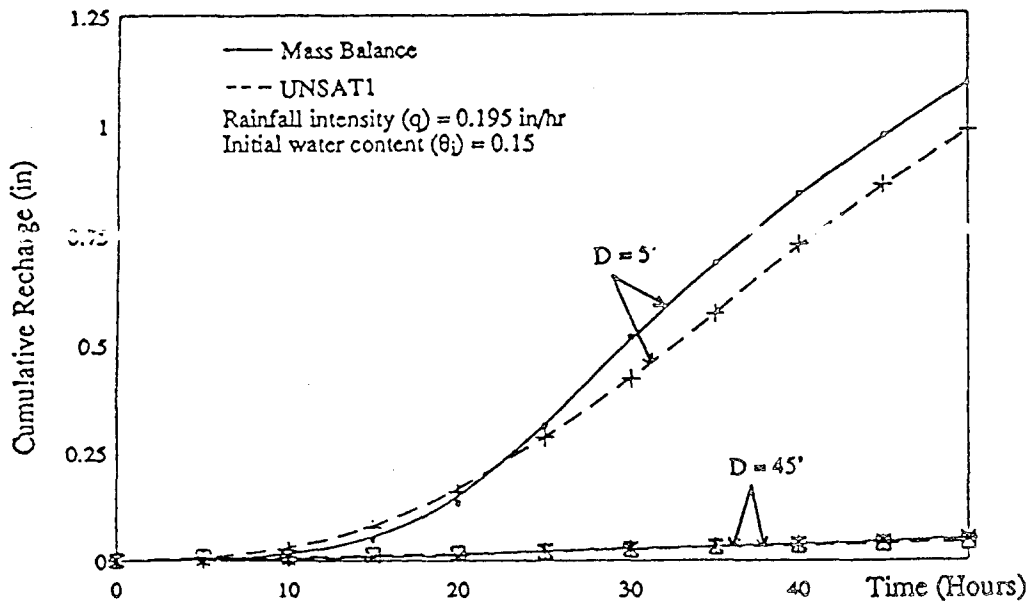


Fig.1 Comparison of recharge predictions for sand

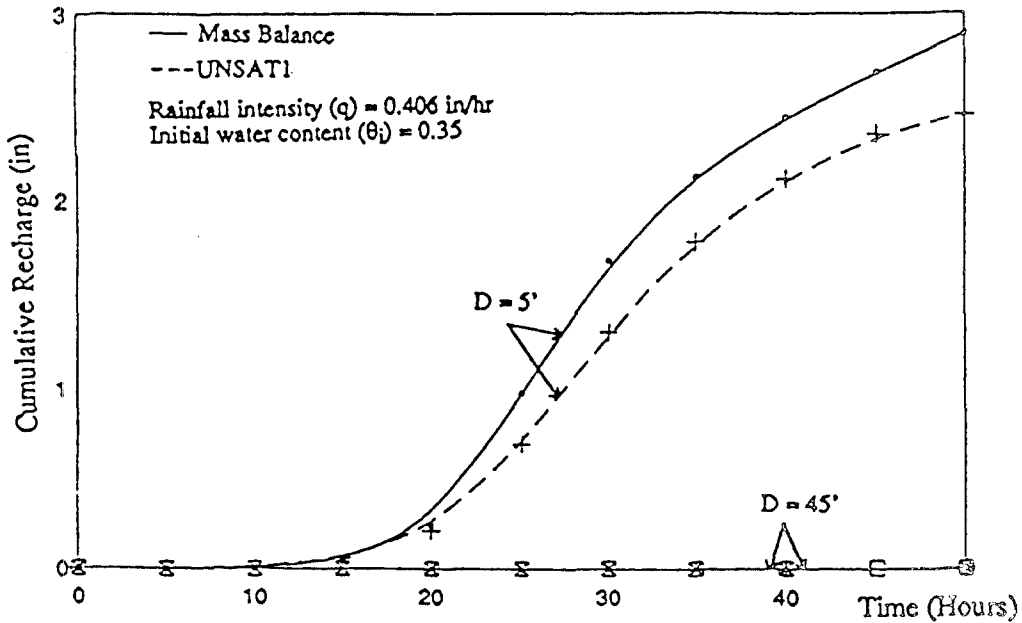


Fig.2 Comparison of recharge predictions for silty clay

관계식을 나타내기 위함이다. 즉,

$$K(\theta_w) = K_s (\theta_w / \theta_s)^{(2b+3)} \quad (3)$$

여기서  $K_s$ 는 포화상태에서의 투수계수(Hydraulic Conductivity)이며,  $\theta_s$ 는 포화상태에서의 체적함수비이며,  $b$ 는 실험에 의해 구해지는 상수(Impirical Constant)이다. Clapp과 Horuberger(1978)에 의해 제안된 수문학적 계수들은 이 연구에서 선택된 4가지의 흙에 따라 각각 다른 값을 채택했다. 식(3)은 Mass Balance Model에서 직접적으로 Recharge를 계산하는데 사용되었다.

UNSAT 1에서, Bottom Boundary Condition에서 자유배수조건(Free Drainage)이 사용되었고, 식(3)을 사용하여 Recharge를 계산했으며, 식(3)은 Unsaturated Zone의 아래 끝부분에서의 함수비( $\theta$ )에 상응하는 값을 사용하였다. 26시간의 dry spell후의 모든 Simulation에서, 강우의 강도는 24시간동안 일정한 것으로 가정했다.

계산결과와의 고찰

Sand나 Silty Clay에서의 누적되는 Recharge의 그림

은 Fig.1과 Fig.2에 보여지는 바와 같다. 또한, 일정한 범위내에서의 Sandy loam과 Silty clay loam(not shown here)을 통한 Mass Balance Model과 UNSAT 1에 의한 예측결과치에 대한 차이는 Fig.1과 2에 보여진바와 같다.

그러므로, Fig.2에 보여지는 것과 같이 그림의 윗부분에서의 오차정도를 고려해 볼때, Mass Balance Model에 의한 결과가 UNSAT 1에 의한 결과보다 비교적 정확하다는 결론을 얻을 수 있다.

Mass Balance Model의 Over prediction은 팔목할만한 사항인데, 그 이유는 중력에 의한 Percolation을 감소시키는 Capillary Gradients를 계산에 고려하지 않았기 때문에 발생하는 오차 때문이다. Capillary Gradient의 영향은 깊이가 낮은 곳보다 깊은 곳에서 현저하다.

균질하고 균등한 초기 함수비를 갖는 Profile에서 Simple Mass Balance Model은 수치해석에 의한 Model 만큼 좋은 예측결과를 가져올 수 있다.

다음으로, Mass Balance Model을 사용하여 Moving Water Table의 영향을 고찰해 보았는데 여기서는 Saturated Zone내에서 비배수의 조건으로 가정했다. 매번의 시간증가 때마다 지하수위(Water Table)을 결정하는데에 Recharge를 고려했으며, 따라서 불포화상

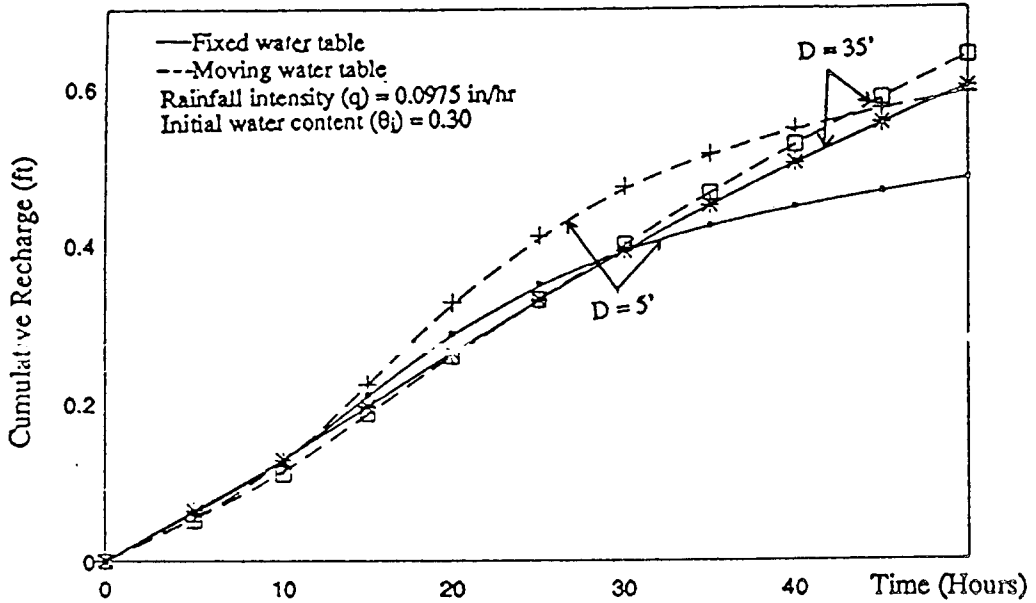


Fig.3 Effect of moving water table on recharges for sand

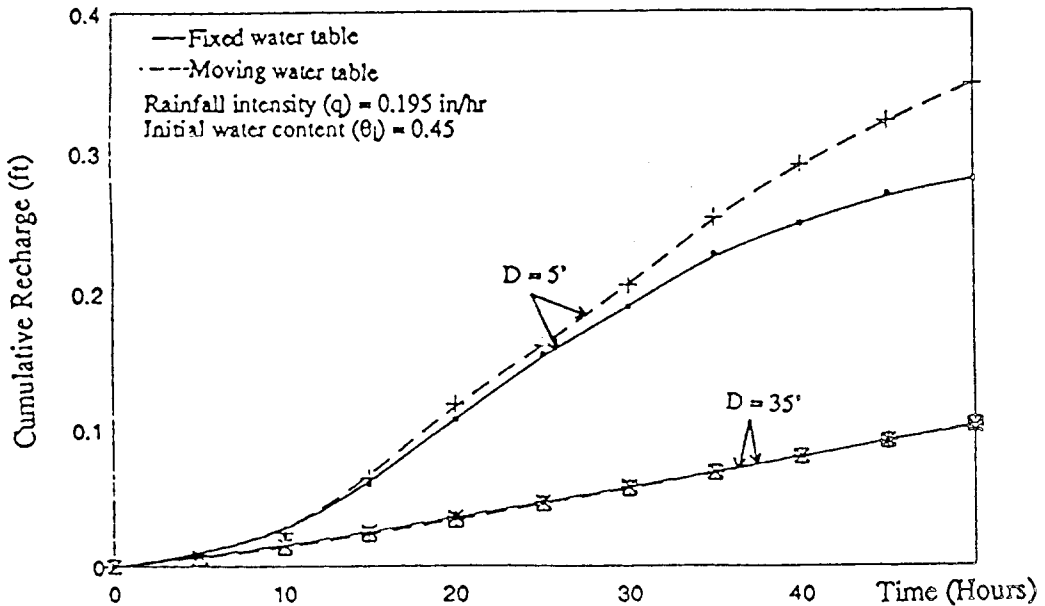


Fig.4 Effect of moving water table on recharges for silty clay

태의 흙의 깊이(Depth of Unsaturated Zone)는 상대적으로 감소된다. Sand와 Silty clay에서 고정수위와 Moving Water Table의 개념을 사용한 누적 Recharge 변화는 Fig.3과 4에 나타나 있다.

그림에서 보는 바와 같이 고정수위일때의 누적 Recharge는 점차적으로 작게 계산됨을 나타내 보이고 있다. 또한 여기서는 보여지지 않았지만, Sandy loam과 Silty Clay loam(not shown here)에서의 Simulation결

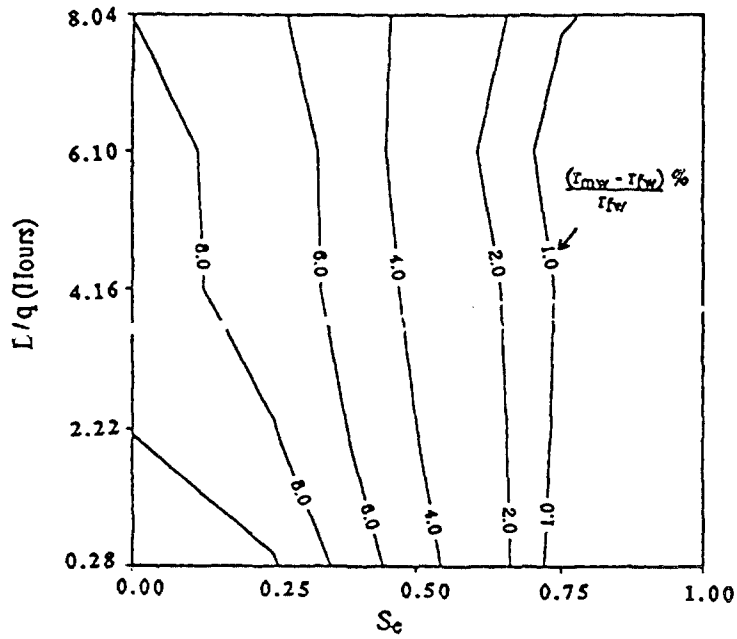


Fig.5 Contours of percentage error due to fixed water table assumption for sand

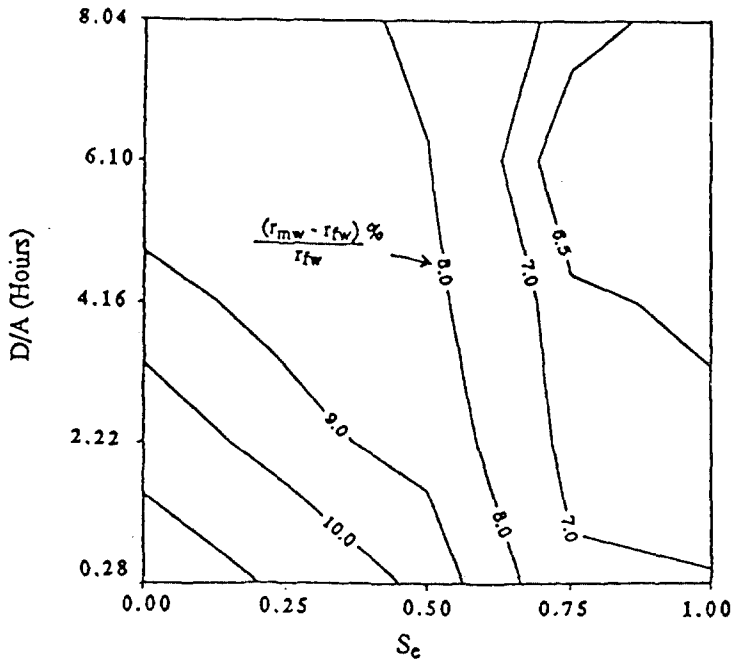


fig.6 Contours of percentage error due to fixed water table assumption for silty clay

과에서도 고정수위와 동수위일때의 차이는 Fig.3과 Fig.4에 나타난 것과 같은 범위에 있다.

Fig.5와 Fig.6에 보여진 바와 같이 고정수위일 때와 동수위일 때와의 사이에 발생되는 error를 Nor-

mized Initial Water Content,  $S_r[(\theta_s - \theta)/(\theta_s - \theta_i)]$ 의 향과 Lumped Parameter  $D/q$ 의 향으로 나타났다. 여기서,  $\theta_i$ 는 초기체적함수비(Initial Water Content),  $\theta_s$ 는 함수능력(Water Content at Field Capacity),  $D$ 는 불포화층의 깊이, 그리고  $q$ 는 평균 강우강도이다.

여러가지 값의  $D$ 와  $q$ 에 대한  $D/q$ 의 비를 가지고 Simulation을 해 본 결과 확연한 결과를 볼 수 있었으며 그 결과  $D/q$ 비는 아주 유용한 측정변수로서 채택될 수 있다는 것을 알았다.

하나의 특정한 조건과 주어진 허용오차하 범위내에서 지하수 흐름에 대한 어떤 연구를 수행하는 경우, 여기에 보여진 그림들을 이용하여 Moving Water Table의 효과를 고려 또는 무시할 수 있는 한계를 결정할 수 있다. 이 그림들은 Saturated-Unsaturated(완전포화-불포화) Flow 또는 Drainage Model을 조합하여 다루는데 기초로 하는 조건들(Condition)을 결정하는데 도움이 될 것이다.

## 결 론

함수비와 토질조건이 전체적으로 균질(Uniform Initial Moisture Content, homogeneous)한 토양의 조건하에서 Simple Mass Balance Method에 의해 계산된 Recharge는 Numerical Model(UNSAT 1)에 의해 계산된 것과 같은 값을 갖지 않는다. 고정수위로 가정했을 때의 결과는 현저한 오차를 보였으며 특히 Shallow Zone일 경우는 더욱 현저했다. 고정수위로 가정하고 계산된 Recharge는 비교적 적게 계산되었는데 그것은 지하수의 거동을 위한 연구에서 바람직하지 못하다.

앞으로 더 필요한 연구로는, Non-Uniform rainfall distribution, heterogeneity의 토양조건들 그리고 함수비의 불균등분포(Non-uniform antecedent moisture conditions)하에서 Recharge의 변화가 규명되어야 할 것이다.

## 감사의 말

이 연구의 투고를 위하여 도와주신 연세대학교 토목공학과 조원철교수님께 감사드리며, 자료수집 및 Typing을 도와주신姜正娥씨에게 심심한 감사를 표하는 바이다.

## 참 고 문 헌

1. GS Campbell, A Simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, Soil Science, Vol.177, pp.311-314, 1974
2. RB Clapp and GM Hornberger, Empirical equations for some soil hydraulic properties, Water Resources Research, Vol.14, No.4, pp.601-604, 1978
3. RA Freeze, "Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin", Water Resources Research, Vol.7, pp.347-366, 1971
4. Van Genuchten, Numerical solutions of the one-dimensional saturated-unsaturated flow equation, Research Report 78-WR-09, Water Resources Program, Department of Civil Engineering, Princeton University, 1978
5. Lee, Kwang Yeol, "Predictions of Hydraulic Conductivity of Compacted Clays Based on Micro-and Macroscopic Parameters", Ph.D. Dissertation, Stevens Institute of Technology, Hoboken, New Jersey, 1992