

# 흙수분저류량-중간류유출-지표포화지역의 동적 반응에 대한 공간적분모형의 개발

이도훈

경희대학교 토목공학과

## 1. 서론

산지 경사면에서의 유출과정의 이해와 유출과정에 대한 신뢰성 있는 모형의 개발은 효율적인 수자원 관리에 필수적이다. 그리고 이를 위하여 경사면에 저장된 흙수분저류량 및 토양으로부터 유출되는 중간류유출의 동적 변동양상을 예측하는 모형이 필요하다. 그러나 유출에 관련된 지배인자들이 공간 및 시간적으로 많은 변화를 가지기 때문에, 유출과정의 정확한 예측 모형 개발에 많은 어려움이 있다. 일반적으로 유출과정에 대한 메커니즘은 Hortonian 지표유출, 중간류유출, 포화지표류유출 등으로 분류될 수 있다 (Dunne, 1983). 습윤·온대 지역의 식생이 존재하는 산지 경사면에서는 Horton 지표류에 의한 유출은 거의 볼수 없으며, Dunne과 Black(1970a,1970b)이 현장실험을 통하여 보인 것처럼 유출수문곡선은 중간류유출 및 포화지표류로 구성된다. 따라서 중간류유출 및 포화지표류가 발생하는 지표포화지역의 동적 변화를 이해하고, 모델링 하는 것이 유출예측을 위하여 중요하다. 물리적 요소를 고려한 공간분포모형을 이용한 중간류유출 및 포화지표류 과정에 대한 연구는 Beven(1977), Govindaraju와 Kavvas (1991) 등이 수행하였으며, Beven and Kirkby(1979), O'Loughlin (1981)는 지표포화지역을 예측하는 간단한 모형 개발에 대한 연구를 하였으며, 공간적분방정식에 기초한 간단한 중간류유출 모형의 개발은 Dooge(1960), Sloan과 Moore (1984), Koussis(1992)가 연구하였다. 본 연구에서는 지표포화지역이 발생될 경우에 비포화흐름을 고려하여 과거 연구들에서 고려되지 않은 흙수분저류량의 변화를 포함한 흙수분저류량-중간류유출-지표포화지역 변수들의 동적 변화를 설명하는 동적 공간적분모형(SIM)의 개발을 목적으로 한다.

## 2. 공간적분모형(SIM)의 구성

경사면에서 지표포화지역이 존재할 경우에 공간적분된 연속방정식 또는 물수지방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dV(t)}{dt} = p(t)(A - S(t)) - Q(t) \quad (1)$$

식 (1)에서  $V(t)$ 는 공간적분된 흡수분저류량,  $p(t)$ 는 평균강우강도,  $A$ 는 경사면의 지표면적,  $S(t)$ 는 지표포화지역의 면적,  $Q(t)$ 는 중간류유출을 각각 의미한다. 식 (1)에서 지표포화지역에 내리는 강우는 침투가 되지 않고 지표유출성분이 되고, 침투량은 지표면이 포화되지 않는 지역에 내리는 강우량( $p(A-S)$ )로 정량화 될 수 있다. 식 (1)에서  $p(t)$ 가 주어지면, 미지수는  $V, Q, S$ 이기 때문에 2개의 방정식을 더 구성하면, 식 (1)은 완전한 동적 시스템이 된다. 따라서 본 연구에서는  $Q$ 와  $S$ 에 대한 다음과 같은 경험적 구성방정식을 제안한다.

$$\frac{dQ(t)}{dt} = f(Q(t)) \quad (2)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = g\left(\frac{dQ(t)}{dt}\right) \quad (3)$$

식 (2)는 중간류유출의 시간미분율은 중간류유출의 함수로 표현됨을 의미하며, 식 (3)은 지표포화지역의 시간미분율은 중간류유출 시간미분의 함수로 변수화 될 수 있음을 의미한다.  $V, Q, S$ 의 동적 반응의 예측을 위한 동적 시스템은 방정식 (1), (2), (3)으로 구성되며, 함수  $f$ 와  $g$ 가 결정되어야 한다. 함수  $f$ 와  $g$ 는 중간류유출과 지표포화지역의 자료를 이용하여 추정할 수 있다.

### 3. 모형의 보정 및 평가

제안된 모형의 보정과 평가는 공간분포모형의 수치해를 이용하여 수행하였다. 그림 1에 제시된 가상경사면에서 비포화-포화 흐름을 설명하는 Richards 방정식에 대한 수치해를 구하여 함수  $f$ 와  $g$ 의 양상을 결정하였다. 수치모의에 선택된 강우양상은 침투강우강도가 0.0079 m/hr이고 지속기간이 16시간인 사인파 모양이다 (그림 2). 그리고 함수  $f$ 는 수치해에서 도출된 중간류유출의 시간미분값( $dQ/dt$ )과 중간류유출( $Q$ )에 대한 회귀분석을 하여 결정하였고, 식 (3)의 함수  $g$ 는 지표포화지역과 중간류유출의 시계열에 대한 회귀분석을 하여 결정된 결과는 아래 식과 같다.

$$f(Q(t)) = 0.0001094 - 0.259Q(t) \quad t > 16 \text{ hours} \quad (4)$$

$$f(Q(t)) = \text{Exp}(81) * Q(t)^{16.1} \quad t < 16 \text{ hours} \quad (5)$$

$$g\left(\frac{dS(t)}{dt}\right) = 66809.5 \frac{dQ(t)}{dt} \quad (6)$$

함수  $f$ 가 강우지속기간과 감수기간으로 분리된 것은 중간류유출 시간미분값과 중간류유출 관계사이의 이력현상 효과가 크기 때문이다. 식 (4),(5),(6)을 식 (2)와 (3)에 각각 대

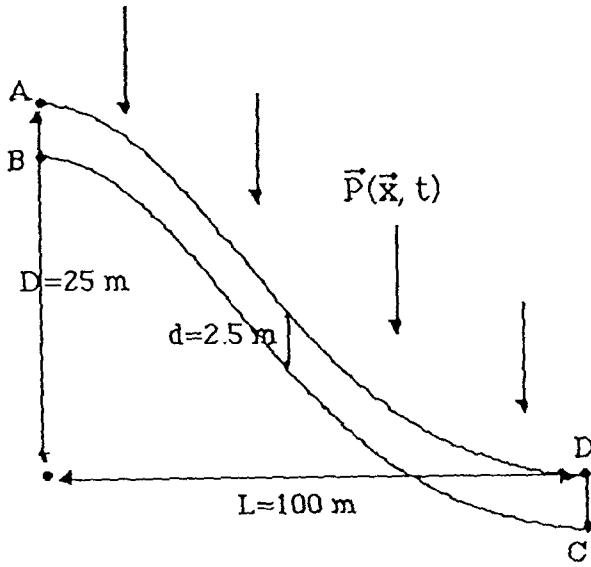


그림 1. 경사면의 모양

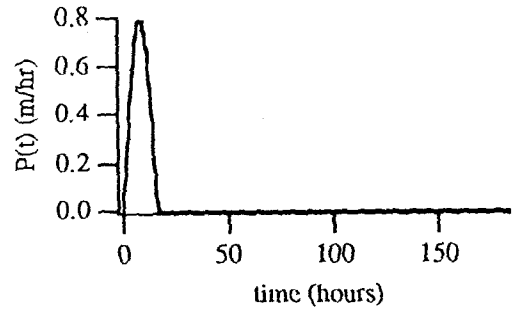


그림 2. 강우강도 형태

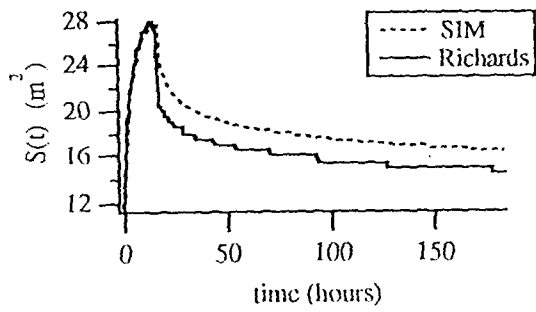
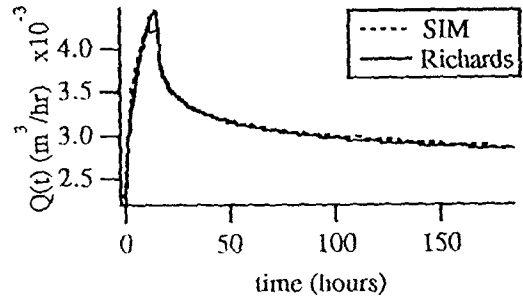
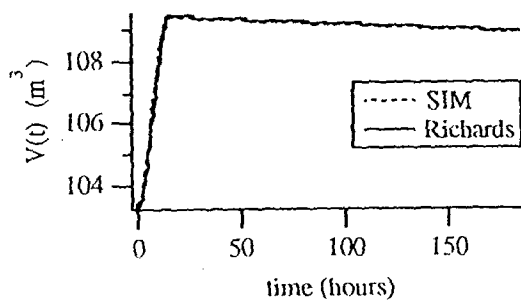


그림 3. 동적 반응의 비교

(SIM=공간적분모형의 반응, Richards=Richards방정식의 반응)

입하여 주어진 초기조건아래 비선형 상미분방정식을 풀면 V, Q, S에 대한 동적 반응을 얻게 된다. 그림 3은 이렇게 보정된 동적 시스템의 반응과 Richards 방정식의 반응과의 비교를 보여주고 있다. 두 모델사이의 흙수분저류량의 반응은 잘 일치하며, 중간류유출 수문곡선도 거의 일치하고 있지만, 공간적분모형(SIM)의 중간류유출 첨두치가 약간 적게 산정됨을 알 수 있다. 그리고 지표포화지역의 동적 반응은 감수기간동안에는 SIM이 Richards 방정식의 해보다 약간 과대 평가되고 있지만, 강우기간 동안의 반응은 두 모델사이에 거의 일치한다.

#### 4. 결론과 향후과제

본 연구는 산지 경사면에서 흙수분저류량, 중간류유출, 지표포화지역 같은 수문변수들의 동적 변화를 설명하는 공간적분모형(SIM)을 개발하기 위하여 수행되었다. SIM의 방정식 양상을 제안하였고, 제안된 SIM의 보정된 반응이 물리적 요소를 고려한 Richards 방정식의 해와 비교할 만한 일치를 보였다. 제안된 동적 모델에 대한 평가가 본 연구에서는 단순한 수문조건 및 수리지질조건 상태에서 수행되었지만, 향후 여러 복잡한 수문·수리지질 조건에 대한 검증이 수행되어야 하며, 식 (2)와 (3)의 구성방정식의 일반화에 대한 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

- Beven, K.J., 1977, Hillslope hydrographs by the finite element method, *Earth Surface Processes*, Vol. 2, p. 13-28.
- Beven, K.J., and Kirkby, M.J., 1979, A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), p. 43-69.
- Dooge, J.C.I., 1960, The routing of groundwater recharge through typical elements of linear storage, *International Association of Scientific Hydrology Publication*, 52, p. 286-300.
- Dunne, T., 1983, Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff, *Journal of Hydrology* 65, p.25-48.
- Dunne, T., and R.D. Black, 1970a, An experimental investigation of runoff production in permeable soils, *Water Resources Research*, 6(2), p. 478-490.
- Dunne, T., and R.D. Black, 1970b, Partial area contributions to storm runoff in a small New England Watershed, *Water Resources Research*, 6(5), p.1296-1311.

- Govindaraju, R.S., and Kavvas, M.L., 1991, Dynamics of moving boundary overland flows over infiltrating surfaces at hillslopes, *Water Resources Research*, 27(8), p. 1885-1898.
- Koussis,A.D., 1992, A linear conceptual subsurface storm flow model. *Water Resources Research*, 28(4), 1047-1052.
- O'Loughlin, E.M., 1981, Saturation regions in catchments and their relations to soil and topographic properties, *Journal of Hydrology*, 53, p.229-246.
- Sloan, P.G., and I.D. Moore, 1984, Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds, *Water Resources Research*, 20(12), p. 1815-1822.