韓國水資源學會誌 論文
第29卷 第2號·1996年 4月
pp. 143~151

지표포화지역-중간류유출-흙수분저류량 관계: II. 동적 분석

Surface Saturation Area-Subsurface Outflow-Soil Moisture Storage Relationships: II. Dynamic Analysis

이 도 훈* · 이 은 태**
Lee, Do Hun · Lee, Eun Tae

Abstract

The dynamic responses in the subsurface outflow, surface saturation area, soil moisture storage are established by numerical experiments with Richards equation. In addition to this, the dynamical relationships between surface saturation area and subsurface outflow, and between surface saturation area and soil moisture storage are also determined by varying the hillslope shape, soil type, and boundary condition. The simulation results indicate that the dynamical relationships between surface saturation area and subsurface outflow, and between surface saturation area and soil moisture storage are approximated by the steady-state relationships. And the dynamic responses of subsurface outflow and surface saturation area are characterized by the double peaks although the rainfall pattern is a simple pulse input. As a result of numerical simulation, the physical mechanism for the occurrence of the double peaks is explained using the concept of variable source area.

요 지

중간류 유출, 지표포화지역, 흙수분저류량 들의 동적 반응을 Richards 방정식을 이용한 수치실험을 통하여 유도하였다. 그리고 수치실험에서 경사면 모양, 토양종류, 경계조건 등을 변화시켜서 지표포화지역-중간류유출 동적 관계 및 지표포화지역-흙수분저류량 동적 관계를 결정하였다. 모의결과에 의하면, 지표포화지역-중간류유출 동적 관계 및 지표포화지역-흙수분저류량 동적 관계는 각 관계들의 정상류 관계에 의해 근사적으로 설명될 수 있다. 그리고 강우양상이 단순한 펄스입력일지라도 중간류유출 및 지표포화지역의 동적 반응은 중복첨두치에 의해 특징지어지며, 중복첨두치의 발생에 대한 물리적 메케니즘은 "variable source area"의 개념을 이용하여 설명하였다.

* 정회원 경희대학교 공과대학 토목공학과 조교수
** 정회원 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서 론

전편의 연구(이도훈과 이은태, 1995)에서는 물리적 모형의 정상류 분석을 통하여 지형특성 및 토양종류의 변화가 지표포화지역-중간류유출 정상류 관계와 지표포화지역-흙수분저류량 정상류 관계에 미치는 민감도 분석 및 변수화에 역점을 두었다. 수치실험을 통하여 유도된 정상류 관계는 평형관계의 양상을 이해하는데 많은 도움을 주며, 동적 관계의 이해를 위해 선행되어야 한다. 그러나 자연현상은 항상 동적 상태를 유지하기 때문에, 동적 반응에 대한 이해를 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 불포화-포화 흐름이론을 기초로 지표포화지역-중간류유출 동적 관계와 지표포화지역-흙수분저류량 동적 관계의 유도에 연구의 동기가 있다.

Govindaraju와 Kavvas (1991)는 경사면에서 중간류흐름, 지표류, 하천흐름 등을 고려한 유한차분 모형을 개발하였다. 이 연구자들이 개발한 모형에서는 지표류와 하천흐름을 묘사하기 위하여 diffusion wave 근사이론을 사용하였으며, 중간류 흐름을 설명하기 위하여 Richards 방정식을 이용하였다. 이들 연구자들은 개발한 모형을 사용하여 강우양상, 초기함수조건, 사면경사, 사면길이 등이 지표포화지역에 미치는 영향을 조사하였다.

현장실험 또는 모형을 통한 지표포화지역의 동적 반응에 대한 연구는 미미할 뿐만아니라, 지표포화지역-중간류유출 동적 관계와 지표포화지역-흙수분저류량 동적 관계에 대한 연구는 거의 없었다. 그리고 강우-유출 모형에 고려되지 않고 있는 지표포화지역의 변화를 고려하기 위하여, 경사면 유출과정에서 중요한 역할을 하는 지표포화지역의 동적 반응과 지표포화지역-중간류유출-흙수분저류량 동적 관계에 대한 이해가 필요하다.

본 연구의 목적은 강우양상, 사면모양, 토양종류, 경계조건 등의 변화에 따른 지표포화지역-중간류유출 동적 관계와 지표포화지역-흙수분저류량 동적 관계 들을 유도하고, 전편의 논문(이도훈과 이은태, 1995)에서 유도된 정상류 관계와 동적 관계를 비교하는데 있다.

2. 연구방법

본 연구는 Richards 방정식(Richards, 1931)을 이용한 수치실험을 통하여 서론에서 제기된 문제를 해결하고자 한다. 이도훈과 이은태 (1995)에서 소개된바 있는 Richards 방정식은 불포화-포화 흐름 영역에서 토양수 흐름을 묘사하는 비선형 편미분방정식이다. 이해를 돕기위해 다시 이 방정식을 아래에 소개하면 다음과 같다.

$$C(\psi)\frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot (K(\psi) \cdot (\nabla \psi + \nabla z)) \qquad (1)$$

방정식 (1)에서 $C(\psi)$는 $\partial\theta/\partial\psi$로서 비수분용량(specific moisture capacity), $K(\psi)$는 불포화투수계수, ψ는 토양수 압력수두, z는 위치수두로서 정의된다. 방정식 (1)은 주어진 초기-경계조건 아래 수치해석기법을 이용하여 풀게 된다. 본 논문에서도 Yeh(1987)가 개발한 FEMWATER 유한요소 프로그램을 이용하여 Richards 방정식의 해를 구하였다.

3. 수치실험결과 및 검토

3.1 수문곡선변수의 정의

수치모의 결과로 얻어지는 중간류유출, 지표포화지역, 흙수분저류량 등의 수문곡선에서 정의되는 초기첨두(IP), 지체첨두(DP), 초기첨두에 대한 시간(TIP), 지체첨두에 대한 시간(TDP) 등을 그림 1에 정의·표시하였다. 그리고 중간류유출, 지표포화지역, 흙수분저류량에 대한 정의는 이도훈과 이은태(1995)에 설명되었으며, 중간류유출은 경사면에서 흘러나오는 중간류의 공간적분된 유량, 지표포화지역은 포화지표류가 발생하는 지역으로 지표면이 물에 포화된 지역, 흙수분저류량은 경사면의 불포화 및 포화 흙에 포함된 토양수분의 총량으로 정의된다.

3.2 강우강도 및 지속기간의 효과 분석

그림 2에 보여진 강우양상을 이용하여, 강우강도 또는 지속기간 등이 지표포화지역 및 중간류유출에 미치는 효과를 이해하기 위하여 강우강도와 강우지속기간을 변화시켜 가면서 표 1에 설명된 것처럼 세 경우 들을 모의·조사하였다. 표 1에서는 각 경우들에 대한 강우강도 및 지속기간 들의 수치값을 설명하고 있다. 세 경우 그림 3에 제시된 사면 단면모양과 경계조건을 사용하였으며, 사면의 토양으로는 Guelph Loam 흙을 사용하였으며 Guelph Loam 흙의 수리학적 성질은 Elrick 등(1990)으로부터 채택하였다. 그림 3에 제시한 모의단면은 온대지방에서 형성되는 전형적인 사면단면모양중의 하나이다 (Ritter, 1986). 그리고 경사면 모의규모로 H/L=0.25, d/L=0.025, L=100m를 수치모의에 사용하였다. 따라서 경우 1-3에서는 강우양상을 제외한 모의에 사용된 모든 변수값 및 모의조건은 동일하였다. 동적모의의 초기조건은, 그림 2에 표시된 것처럼, f_0=0.000026424(m/hr)의 강우강도를 사용하여 얻은 정상류 결과를 이용하였다.

표 1. 그림 2의 강우양상에 나타난 변수값

case	f_0/K_s	α/K_s	δ(hours)	강우량(cm)
1	0.002	0.2	48	12.8
2	〃	0.4	〃	25.5
3	〃	0.2	24	6.4

註 : K_s=0.013212 m/hr=Guelph Loam 흙의 포화투수계수, f_0=선행강우강도, α=강우강도, δ=지속기간

그림 4는 모의된 중간류유출(q), 지표포화지역(s), 흙수분저류량(v) 들의 수문곡선을 보여주고 있다. 그림 4에서 q, s, v 변수들은 경사면지표면적으로 나누어진 값들이다. 그림 4의 모의 결과는 지표포화지역과 중간류유출 수문곡선에서는 지체첨두가 발생됨을 보이고 있다. 그러나, 흙수분저류량 수문곡선에서는 지체첨두는 발생되지 않았다. 세 모의 경우들의 지표포화지역, 중간류유출, 흙수분저류량 들의 수문곡선에서 초기첨두치의 발생시기는 강우종료시각과 일치하며, 초기첨두치 크기는 강우량에 따라 변하고 있음을 알 수 있다. 모의 실험중 가장 많은 강우량이 사용된 경우 2에서는 중간류유출의 지체첨두값은 초기첨두값 보다 크며, 지표포화지역 지체첨두는 초기첨두보다 작음을 보여준다. 그리고 짧은 지속기간을 모의한 경우 3에

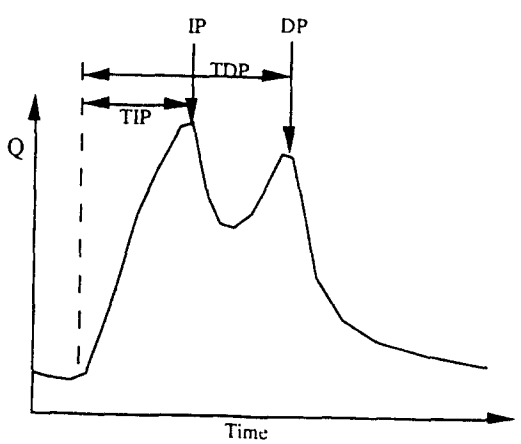


그림 1. 수문곡선 변수의 정의

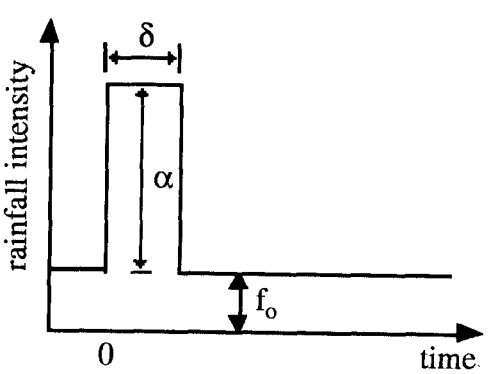


그림 2. 모의에 사용된 강우양상

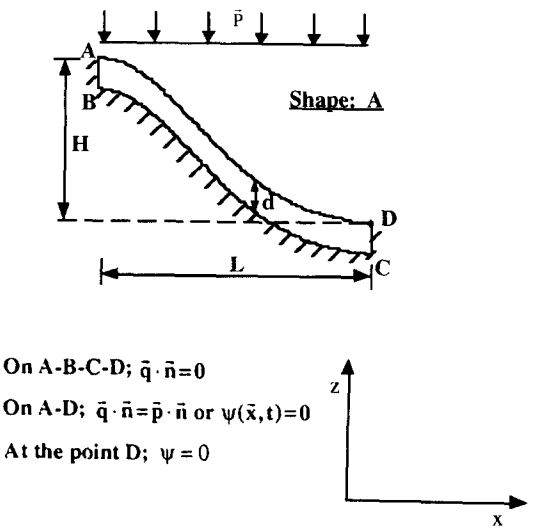


그림 3. 모의 단면모양 및 경계조건
($\bar{P}$=강우벡터, $\bar{q}$=중간류 속도 벡터, $\bar{n}$=지표면에 수직인 단위벡터, ψ=토양수 압력수두)

서는 지체첨두값이 매우 저감되어 중요하지 않게 된다. 중간류유출과 지표포화지역의 지체첨두의 크기와 지체시간은 주어진 사면조건에서는 강우양상에 의존함을 알 수 있다. 모의에서 가정된 Guelph Loam 흙의 포화투수계수가 낮기 때문에, 그림 4에서 알 수 있는 것처럼, 지체첨두치에 대한 시간이 매우 지연 되게 된다. 이렇게 큰 지체시간은 실제 유역에서 발생되는 지체시간과 비교하면 비현실적이다. 그러나 물리적 모형의 모의로부터 도출된 지체첨두의 발생은 경사면에서 중간류유출과 지표포화지역의 과정이 비선형이며 복잡함을 보여준다. 그림 4의 결과는 지표포화지역과 중간류유출의 동적반응은 거의 동일한 양상을 보이며, 초기첨두 및 지체첨두에 대한 시간도 동일하다. 그리고 지표포화지역의 동적 반응은 강우강도와 지속기간에 의해 크게 영향을 받는다.

그림 5는 무차원화된 지표포화지역(σ)-중간류유출(θ) 관계 및 지표포화지역(σ)-흙수분저류량(ϕ) 관계 들의 모의결과를 표시하고 있다. 이도훈과 이은태(1995)에서 정의된 것처럼 무차원 지표포화지역(σ)는 다음 식에 의해 정의된다.

$$\sigma = SSA/A \quad (2)$$

SSA는 지표포화지역, A는 사면지표면적을 의미한다. 그리고 무차원 중간류유출(θ)는 다음 식에 의해 정의된다.

$$\theta = (Q * L^2)/(A * K_s * d * H) \quad (3)$$

식 (3)에서 Q는 중간류유출, L은 사면길이, K_s는 포화투수계수, d는 토심, H는 사면높이를 의미한다. 그림 5에서 점들은 이도훈과 이은태(1995)에서 유도된 정상류 관계를 표시하며, 실선은 동적 관계를 표시하고 있다. 일반적 경향으로 동적 관계는 시계방향의 이력곡선(hysteresis loop)을 나타내며 동적으로 변하고 있다. 그러나 이력곡선의 크기는 아주 작으며, 동적 관계의 경로는 정상류 관계를 따르고 있음을 알 수 있다.

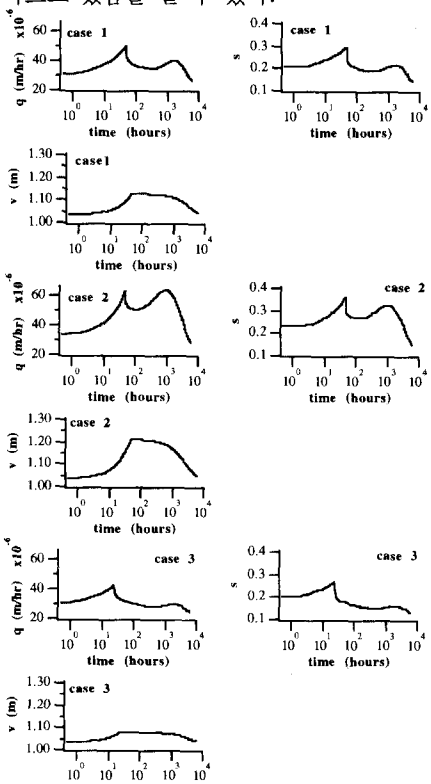


그림 4. 지표포화지역(s), 중간류유출(q), 흙수분저류량(v) 수문곡선

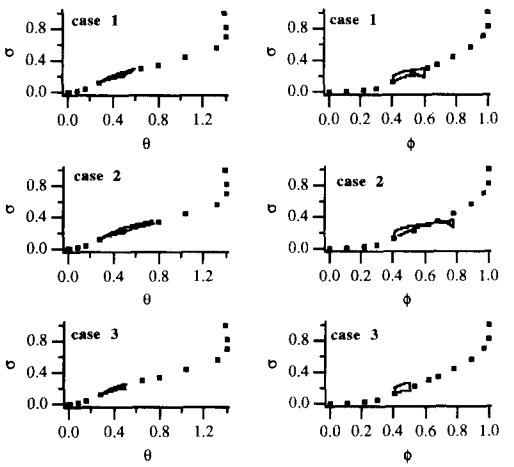


그림 5. 지표포화지역(σ)-중간류유출(θ) 관계 및 지표포화지역(σ)-흙수분저류량(ϕ) 관계

3.3 사면모양, 토양종류, 경계조건 효과 분석

이 절에서는 지표포화지역, 중간류유출, 흙수분저류량 들의 동적 반응에 대한 사면모양, 토양종류, 경계조건 등이 미치는 효과를 검토하고자 한다. 표 2에 모든 모의 경우들에 대한 경사면의 단면도, 토양종류, 모의영역의 기하학적 특성 등을 요약하였다. 그림 6에서는 표 2의 모의경우들(경우 4, 5, 6, 9)에 사용된 단면모양 및 경계조건, 그림 7에서는 모의경우 7과 8에 사용된 평면모양, 그림 8은 모의경우 10에 사용된 단면모양과 경계조건 등을 보여주고 있다. 그림 6의 사면모양들은 대표적인 사면모양들을 제시한 Hewlett(1982)과 Ritter(1986)에 근거하여 모의에 채택하였고, 흙의 수리학적 성질은 Elrick 등(1990)과 van Genuchten(1980)으로부터 선택하였다. 표 2의 경우들에서 모의에 사용된 강우양상은 그림 2에 제시되었으며, 모든 경우에 있어서 강우강도의 크기 및 지속기간은 경우 1과 같았다. 그리고 표 2의 모의 경우들에서 동적 모의에 사용된 초기조건으로는 $f_0=0.000026424$(m/hr)의 강우강도를 사용하여 획득한 정상류 모의 결과를 사용하였다.

그림 9에서는 사면모양, 토양종류, 경계조건 들이 중간류유출(q) 수문곡선에 미치는 효과를 보여주고 있다. 이 그림에서는 다른 경우들과의 비교를 위하여 경우 1의 기본모의 결과를 첨부하였다. 중간류유출의 초기첨두는 경우 10을 제외한 모든 경우에서 강우종료와 함께 발생되며, 경우 10에서는 강우종료후 약 22시간 뒤에 발생된다. 토양을 제외한 강우양상을 포함한 모든 모의 조건들이 같을지라도, Plainfield sand을 가정한 경우 9는 다른 경우들과 비교하면 중간류유출이 월등히 크다. 이 결과는 포화투수계수가 중간류유출 과정에서 중요한 역할을 하고 있다는 사실을 보여주고 있으며, Freeze(1972) 역시 Richards 방정식을 이용한 수치실험을 통하여 같은 결과를 보여준바 있다. 경우 7의 수렴경사면(hollow)에서는 중간류유출의 지체첨두값이 초기첨두값보다 크게 됨을 모의결과는 보여준다. 그리고 경우 4, 5에서는 중간류유출의 지체첨두가 발생되지 않고 있으며, 경우 6, 8, 10에서는 중간류유출 지체첨두가 발생되지만 중요하지 않음을 알 수 있다. 경우 6의 오목사면(shape D)에서는 중간류유출 동적 변화가 거의 없이, 중간류유출 동적 반응은 안정된 상태를 유지하고 있다.

그림 10은 사면모양, 토양종류, 경계조건 등이

표 2. 모의경우들의 기하학적 특성 및 토양 특성

case	cross section geometry	plan geometry	H/L	d/L	soil type	ρ/L
4	B	parallel	0.25	0.025	Guelph Loam	∞
5	C	〃	〃	〃	〃	〃
6	D	〃	〃	〃	〃	〃
7	A	hollow	〃	〃	〃	1
8	〃	spur	〃	〃	〃	1
9	〃	parallel	〃	〃	Plainfield Sand	∞
10	〃	〃	〃	〃	Guelph Loam	〃

註: L=slope length=100 m, H=slope height, d=soil depth

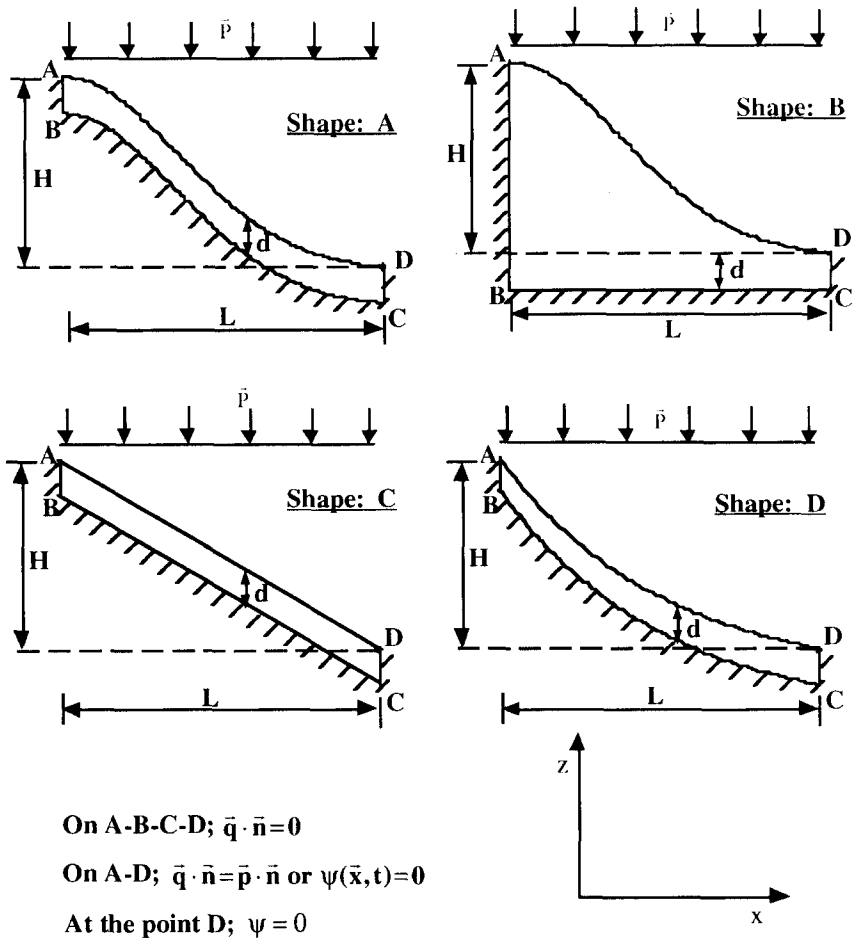


그림 6. 모의에 사용된 단면모양 및 경계조건
($\bar{P}$=강우벡터, $\bar{q}$=중간류 속도 벡터, $\bar{n}$=지표면에 수직인 단위벡터, ψ=토양수 압력수두)

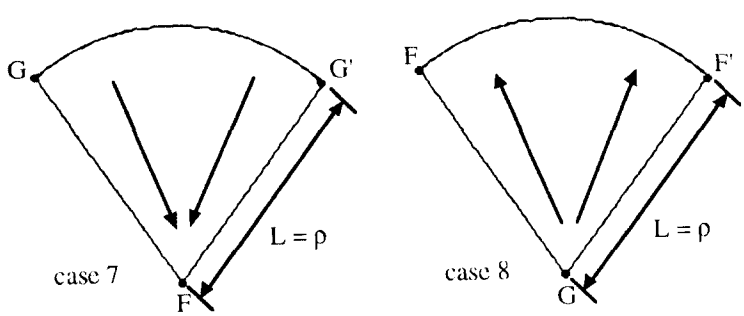
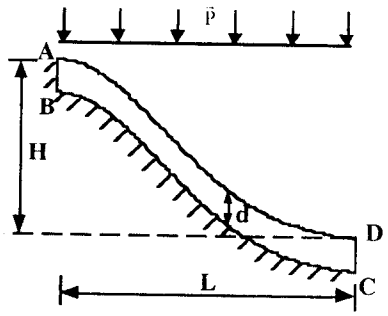


그림 7. 경우 7과 8의 모의에 사용된 평면모양



On A-B-C; $\bar{q}\cdot\bar{n}=0$

On A-D-C; $\bar{q}\cdot\bar{n}=\bar{p}\cdot\bar{n}$ or $\psi(\bar{x},t)=0$

그림 8. 경우 10의 모의에 사용된 단면모양 및 경계조건 ($\bar{P}$=강우벡터, $\bar{q}$=중간류 속도 벡터, $\bar{n}$=지표면에 수직인 단위벡터, ψ=토양수 압력수두)

지표포화지역(s) 수문곡선에 미치는 영향을 보여주고 있다. 경우 5, 7, 9에서는 지표포화지역의 동적 반응은 안정되어, 강우변화와 시간에 따라 거의 변하지 않음을 보여준다. 이들 경우들과는 다르게 경우 6, 8에서는 지표포화지역이 시간에 따라 많이 변함을 보여준다. 따라서 오목사면과 분산사면에서는 지표포화지역의 동적 반응은 중간류유출의 변화에 따라 매우 민감하게 된다. 그리고 지표포화지역, 중간류유출 동적 반응의 양상 및 초기·지체첨두의 크기와 지체시간은 사면모양, 토양종류, 경계조건에 따라 변하고 있음을 수치실험은 보여주고 있다.

그림 11은 사면모양, 토양종류, 경계조건 등이 토양수분저류량(v) 수문곡선에 미치는 효과를 보여주고 있다. 토양수분저류량 수문곡선에서는 지체첨두가 발생되지 않고 있으며, 모의된 경우들의 수문곡선의 기하학적 양상은 서로 비슷함을 알 수 있다. 그리고 모의된 모든 경우에서 초기첨두의 발생은 강우종료와 일치하고 있다.

그림 12는 사면모양, 토양종류, 경계조건 들이 무차원 지표포화지역(σ)-중간류유출(θ) 관계에 미치는 영향을 보여주고 있다. 이 그림에서 점들은 정상류 관계를 표시하고, 실선은 동적 관계를 의미한다. 지표포화지역-중간류유출 관계의 동적 경로의 기하학적 모양은 사면모양, 토양종류, 경계조건 등의 조건에 따라 변하고 있다. 지표포화지역-중간류유출 동적 관계의 일반적인 경향은 동적 경로가 정상류 관계를 따라서 시계방향으로 돌면서 거동하고 있다. 따라서 이도훈과 이은태 (1995)에서 유도된 정상류 관계는 동적 관계를 설명하는데 유용하게 사용될 수 있다고 생각된다.

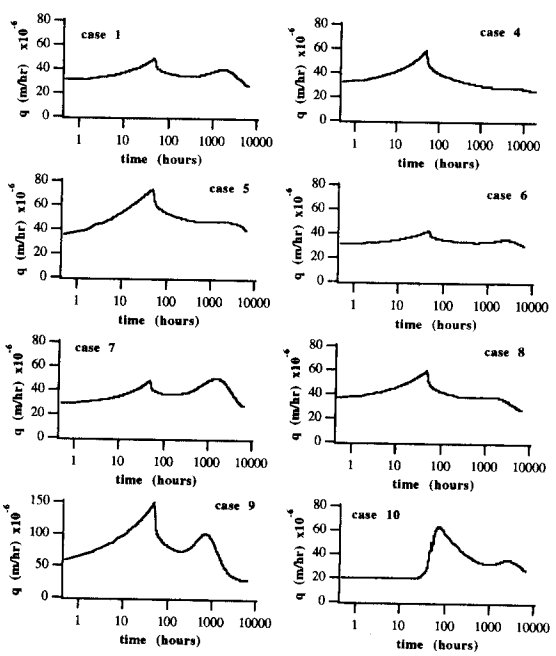


그림 9. 중간류유출(q) 수문곡선

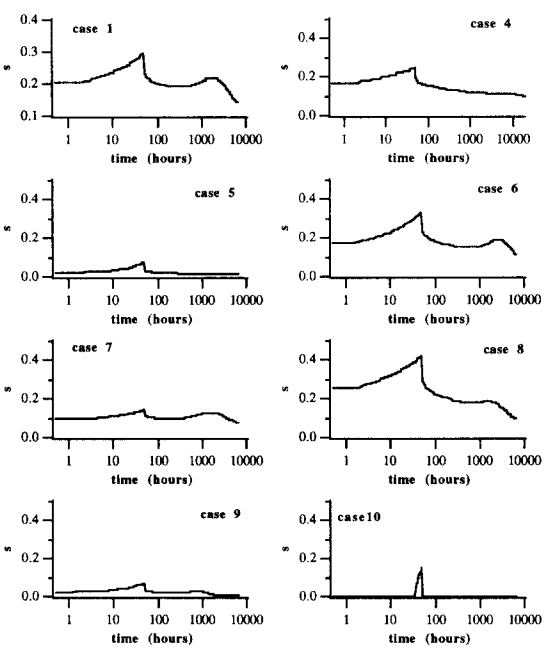


그림 10. 지표포화지역(s) 수문곡선

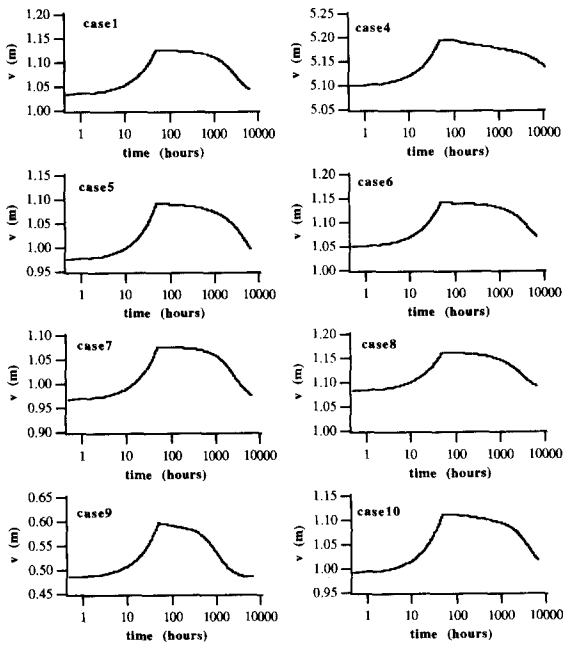


그림 11. 홁수분저류량(v) 수문곡선

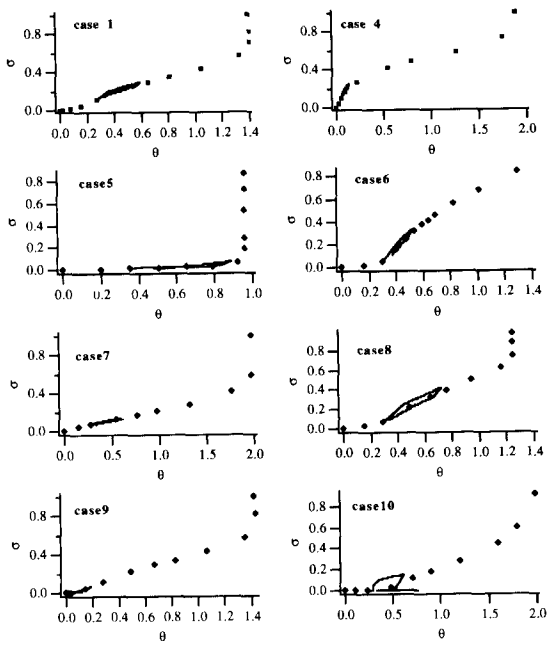


그림 12. 지표포화지역(σ)-중간류유출(θ) 관계

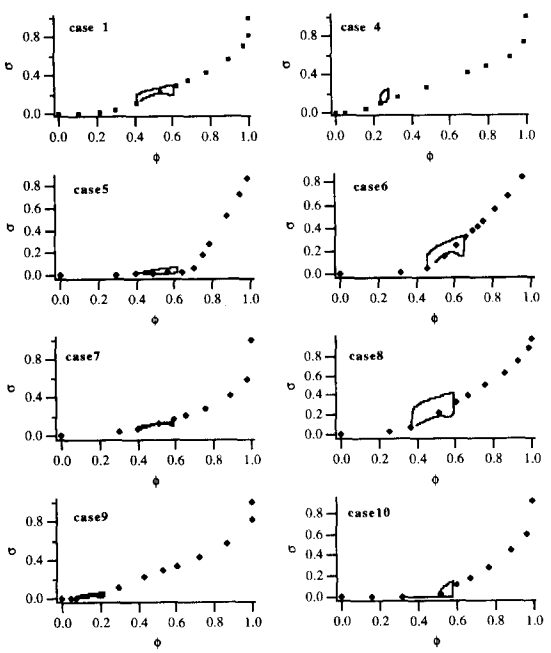


그림 13. 지표포화지역(σ)-홁수분저류량(ϕ) 관계

그림 13은 사면모양, 토양종류, 경계조건 등이 무차원 지표포화지역(σ)-홁수분저류량(θ) 관계에 미치는 효과를 보여주고 있다. 이 관계의 동적 경로도 역시 정상류 관계를 따라 시계방향으로 움직이는 이력현상을 보여주고 있다. 특히 경우 6과 8에서 이력곡선의 규모가 다른 경우에 비하여 현저하게 나타나고 있다. 그러므로 홁수분저류량이 같을지라도 상승기간 또는 감소기간에 따라 지표포화지역의 크기가 다르게 된다. 그리고 지표포화지역-홁수분저류량 동적 관계와 정상류 관계가 완전하게 일치하지는 않지만, 지표포화지역-홁수분저류량 동적 관계는 지표포화지역-홁수분저류량 정상류 관계에 의해 근사적으로 설명될 수 있음을 수치실험은 보여주고 있다.

3.4 중복첨두치에 대한 분석

주어진 수문조건 아래서 Richards 방정식의 모의를 통하여 중간류유출 및 지표포화지역의 첨두값들이 지체됨을 알 수 있었다. 지체첨두가 발생되는 수학적 기원은 경사면의 토양수분 흐름 과정에서 나타나는 비선형성 때문일 것으로 생각된다. 물리적으로는 강우기간동안 중간류유출이 증가하고 하천근처의 저사면에서는 지표포화지역이 확대하게 된다. 그리고 이 기간동안 경사면에서는 침투 및 함양율이 증가하기 때문에 포화대가 사면의 위쪽으

로 이동하게 된다. 그리고 강우후 사면의 위쪽 포화대에 저장된 토양수가 토양수의 재분배기간 또는 감수기간 동안 저사면으로 이동하게 되어 중간류유출이 증가하고, 지표포화지역이 다시 확장되기 때문에 지체첨두가 발생된다. Hewlett과 Nutter (1970)는 이렇게 동적으로 변화하는 지표포화지역 같은 유출원 지역의 동적특성을 설명하기 위하여 "variable source area"의 개념을 제안하였다. 따라서 중간류유출 및 지표포화지역의 지체첨두 발생에 대한 물리적 메케니즘으로 "variable source area"의 개념을 이용하여 설명할 수 있으며, 향후 현장실험 및 이론연구를 통하여 이 가설에 대한 검증이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 Richards 방정식을 이용하여 강우양상, 경사면 모양, 토양종류, 경계조건 등을 변화시킨 수치실험을 통하여 지표포화지역, 중간류유출, 홁수분저류량 등의 동적반응을 유도하고, 지표포화지역-중간류유출 동적 관계, 지표포화지역-홁수분저류량 동적 관계를 유도하였다. 수치실험을 통하여 얻어진 결론들은 다음과 같다.

(1) 호우사상이 단순한 강우입력일지라도 지표포화지역과 중간류유출 수문곡선에서는 지체첨두가 발생될 수 있지만, 홁수분저류량 수문곡선에서는 지체첨두가 발생되지 않았다.

(2) 지표포화지역-중간류유출 관계의 동적 관계와 정상류 관계는 거의 일치하고 있다. 그리고 지표포화지역-홁수분저류량 동적 관계는 이력현상을 많이 보이지만, 동적 관계는 정상류 관계에 의해 근사적으로 설명될 수 있다.

(3) 지표포화지역 및 중간류유출 수문곡선의 지체첨두와 지체첨두에 대한 시간, 지표포화지역-중간류유출 동적 관계, 지표포화지역-홁수분저류량 동적 관계는 강우양상, 경사면 단면모양, 토양종류, 경계조건 등의 모의조건에 따라 변화한다.

(4) "variable source area"의 개념은 경사면에서 중복첨두치 발생에 대한 물리적 해석을 위하여 유용하게 사용될 수 있는 개념이다.

참 고 문 헌

이도훈, 이은태 (1995). "지표포화지역-중간류유출-홁수분저류량 관계: I. 정상류 분석." 한국수자원학회지, 제28권, 제5호, pp. 129-140.

Elrick, D.E., Reynolds, W.D., Geering, H.R., and Tan, K.A. (1990). "Estimating steady infiltration rate times for infiltrometers." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 4, pp. 759-769.

Freeze, R.A. (1972). "The role of subsurface flow in generating surface runoff: 2. Upstream source areas." *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 5, pp. 1272-1283.

Govindaraju, R.S., and Kavvas, M.L. (1991). "Dynamics of moving boundary overland flows over infiltrating surfaces at hillslopes." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 8, pp. 1885-1898.

Hewlett, J.D., and Nutter, W.L. (1970). "The varying source area of streamflow from upland basins." *Proceedings of the Symposium on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management*, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 65-83.

Hewlett, J.D. (1982). *Principles of forest hydrology*. The University of Georgia Press, Athens, Georgia.

Richards, L.A. (1931). "Capillary conduction of liquids through porous mediums." *Physics*, Vol. 1, pp. 318-333.

Ritter, D.F. (1986). *Process geomorphology*. Wm. C. Brown Publishers, Dubuque, Iowa.

van Genuchten, M.Th. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892-898.

Yeh, G.T. (1987). "FEMWATER: A finite element model of water flow through saturated-unsaturated porous media-first revision." *ORNL-5567/R1*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.

〈접수: 1995년 5월 9일〉