

지표포화지역-중간류유출-흙수분저류량 관계: I. 정상류 분석 Surface Saturation Area-Subsurface Outflow-Soil Moisture Storage Relationships: I. Steady-State Analysis

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

Abstract

In this study we derived steady-state relationships between surface saturation area and subsurface outflow, and between surface saturation area and soil moisture storage through numerical experiments with Richards equation on a hillslope. Numerical experiments analyzed the sensitivity of topographic and soil hydraulic properties on steady-state relationships between surface saturation area and subsurface outflow. And the power law for the extent of surface saturation area was determined as a function of subsurface outflow or soil moisture storage.

요 지

다공성 매질에서의 불포화-포화 흐름을 묘사하는 Richards 방정식을 이용한 수치실험을 통하여 경사면에서 지표포화지역-중간류유출 정상류 관계 및 지표포화지역-흙수분저류량 정상류 관계를 유도하였다. 수치실험에서는 지형인자 및 토양 수리특성의 변화가 지표포화지역-중간류유출 관계에 미치는 민감도를 분석하고, 지표포화지역을 중간류유출 또는 흙수분저류량의 함수로 표시하는 역법칙을 결정하였다.

1. 서 론

지표포화지역은 침식기준면 또는 사면저지대 하천주위의 지표면이 포화된 지역으로 강우동안 확장

되거나 또는 강우가 그친 후에 감소하면서 동적 변화를 하고 있다. 일반적으로 습윤-온대 지역의 산악지 경사면에서는 침투되는 물에 의해 지하수위가 상승하고, 계곡에 위치한 하천 근처에서는 지하수위가 지표면 가까이에 존재하므로, 지표면이 상승

* 경희대학교 토목공학과 조교수

** 경희대학교 토목공학과 교수

하는 지하수위에 의해 쉽게 포화된다. 그리고 지표포화지역에 떨어지는 강우는 침투가 되지 않고 지표유출이 되어 유출수문곡선에 큰 영향을 미치게 된다 (Dunne과 Black, 1970a,b). 따라서 지표포화지역의 발생과 크기를 예측하는 것은 하천유수의 유량, 체적, 첨두유량, 첨두시간, 경사면에서의 용질유하시간을 예측하는데 중요한 의미를 가진다.

지표포화지역같은 유출원 지역의 동적 특성을 설명하기 위하여 Hewlett과 Nutter(1970)는 “variable source area” 개념을 제안하였다. Dunne 등 (1975)은 실험 유역에서 지표포화지역의 크기를 추정하는 연구들을 요약하였으며, 유출원지역의 추정을 위한 간단한 지표포화지역 예측방법 개발의 필요성을 제시하였다. 그리고 그들은 지표포화지역의 크기는 기저유출, 선행강우지표, 지하수위 같은 수문인자들의 함수로 정량화를 할 수 있다고 제안하였다. Gburek(1990)은 “effective contributing area (ECA)”를 강우전 기저유출의 함수로 변수화한 멱법칙(power law)을 개발하였다. 연구대상 유역은 펜실베이니아주 Mahantango Creek 유역내 Paul 유역이었으며, ECA의 결정에 강우-유출 자료를 이용하였다. 이 연구에서 ECA는 하천표면적과 지표포화지역의 합으로 정의되며, ECA는 유출 체적을 강우깊이로 나누어서 계산되었다.

현장조사의 어려움을 해소하는 불포화-포화 흐름 이론을 이용한 모형연구를 통하여 지표포화지역의 동적 특성과 유출과정사이의 관계를 이해하려는 연구들도 있었다 (Beven, 1977; Govindaraju과 Kavvas, 1991). 이런 세밀하고 복잡한 모의 모형들에 대한 대체모형으로써, 지표포화지역의 크기를 예측하는 간단한 모형들이 제안되었다. Beven과 Kirkby(1979)는 지표포화지역의 효과를 반영한 간단한 물리학적 수문 모형을 개발하였다. 이 모형에서 지표포화지역의 크기는 경사면의 지형특성과 포화저류량을 관련시켰다. O’Loughlin(1981)은 지표포화지역 발생조건으로써 Beven과 Kirkby (1979)에 의해 유도된 발생조건과 비슷한 조건을 유도하였으며, 지표포화지역의 크기는 유역지형인자, 토양전달계수, 경사도, 기저유출 등으로 변수화 하였다. 그리고 이 연구에서 개발된 개념을 실제유역에서 침윤지역 추정에 적용하였다 (O’

Loughlin, 1986).

본 연구의 동기는 불포화-포화 흐름 이론을 이용한 수치실험을 통하여 지표포화지역의 추정 및 경사면에서 지표포화지역을 고려한 강우-유출 모형의 개발에 필요한 지표포화지역-중간류유출 관계 및 지표포화지역-흡수분저류량 관계를 이해하는데 있다. 수치실험에서는 2차원 단면을 사용하였으며 흡의 수리조건으로 등방성, 등질성을 가정하였다. 두 편의 연구중 본 편에서는 정상류 상태를 가정하여 물리적 모형을 모의하여 지표포화지역-중간류유출 정상류 관계, 지표포화지역-흡수분저류량 정상류 관계들의 유도에 역점을 두었다. 그리고 본 연구의 목적은 지형특성 및 토양의 변화에 따른 지표포화지역-흡수분저류량 관계, 지표포화지역-중간류유출 관계들의 민감도를 조사하고, 이 관계들을 물리적으로 측정 가능한 변수들로 변수화하여 일반적인 관계를 유도하는데 있다. 본 연구에서 분석된 관계는 경사면에서 지표포화지역의 추정 및 해석, 지표포화지역의 현장 실험계획 수립 등에 활용될 수 있다.

2. 경사면 흐름 과정의 정의

그림 1은 경사면에서 지표포화지역, 포화지표류, 중간류 흐름의 경로를 도식적으로 보여주고 있다. 지표포화지역은 지표면이 물에 포화된 지역으로, 포화지표류가 발생하는 지역이다. 모관수대(capillary fringe)의 영향을 무시하면 지표포화지역에서는 토양수압력이 대기압과 같거나 또는 크게된다. 따라서 수치실험에서는 이 조건을 이용하여 지표포화지역의 크기를 추정하였다. 그림 1에서 포화지표류(saturation overland flow)는 지표포화지역에 내리는 강우에 의해 발생된 지표류로 정의된다.

그리고 본 연구에서 중간류는 경사면의 포화대에 저장되어 있는 지하수의 흐름으로 정의된다. 중간류유출은 경사면지역에서 흘러나오는 중간류의 공간적분류 유량으로 정의한다. 그러므로 중간류유출은 하천으로 직접 유입되는 중간류와 침윤면을 통하여 지표면으로 환원되는 중간류의 합을 의미한다. 그리고 다음의 적분방정식으로 중간류유출(Q(t))을 추정할 수 있다.

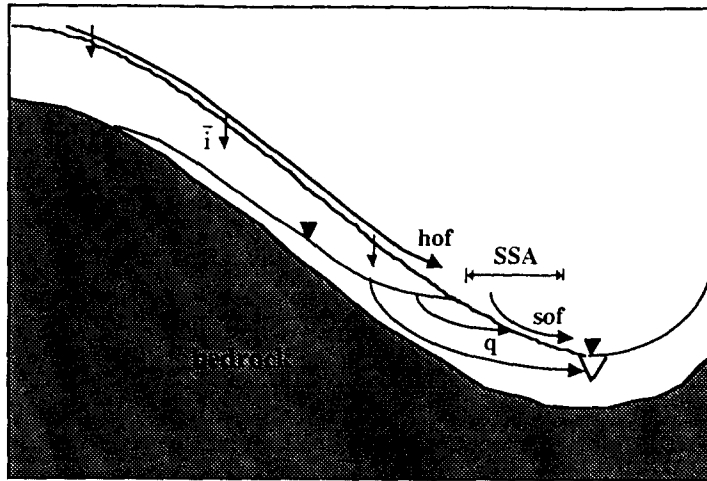


그림 1. 지표포화지역(SSA), 포화지표류(sof), 중간류흐름(q)의 경로
(hof = Hortonian 지표류, \bar{i} = 침투)

$$Q(t) = \int \int_{ob} \bar{q} \cdot \bar{n} dB \quad (1)$$

식 (1)에서 $\bar{q} \cdot \bar{n}$ 은 중간류유출 경계면(ob)에서 중간류흐름을 의미하며, \bar{q} 는 중간류 속도 벡터, \bar{n} 는 중간류유출 경계면에 수직인 단위벡터를 나타낸다. 중간류 유출 경계면(ob)은 그림 1에서 중간류가 하천으로 유입되는 하천경계면과 지표포화지역(SSA)으로 구성된다. 그리고 중간류유출(Q(t))은 중간류흐름을 표면적분 하였기 때문에 단지 시간만의 함수가 된다.

흡수분저류량은 경사면의 불포화 및 포화 흡에 포함된 토양수분의 총량으로 정의 되며, 아래의 식을 이용하여 흡수분저류량(V(t))을 추정하였다.

$$V(t) = \int \int \int \theta(\bar{x}, t) dz dy dx \quad (2)$$

식 (2)에서 θ 는 흡습수비를 의미한다. 그리고 V(t) 역시 흡습수비를 공간적분 하였기 때문에 시간만의 함수이다.

3. 수치실험

3.1 지배방정식

본 연구의 수치실험에 사용된 지배방정식은 Richards 방정식이다. Richards 방정식(Richards, 1931)은 불포화-포화 다공성매질에서의 흐름을 묘사하며 다음과 같이 표현된다.

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot (K(\psi)) \cdot (\nabla \psi + \nabla z) \quad (3)$$

위의 방정식에서 $C(\psi)$ 는 $\partial \theta / \partial \psi$ 로서 비수분용량(specific moisture capacity), $K(\psi)$ 는 불포화투수계수, ψ 는 토양수 압력수두, z 는 위치수두로서 정의된다. 비수분용량과 불포화투수계수는 종속변수인 토양수 압력수두의 함수이므로 Richards 방정식은 비선형 편미분방정식이 된다. 본 연구에서는 Richards 방정식을 풀기위하여 초기-경계 조건들 뿐만 아니라 $C(\psi)$ 와 $K(\psi)$ 에 대한 함수도 반드시 정의되어야 한다. 본 연구에서는 초기-경계 조건 문제를 유한요소 프로그램인 FEMWATER (Yeh, 1987)를 이용하여 Richards 방정식의 해를 구하였다.

3.2 수치실험설계

정상류 수치실험에 사용된 경사면의 기하학적 특성 및 토양종류를 표 1에 요약하였다. 표 1에는 단면모양, 평면모양, 경사도, 토심, 토양종류, 평면지형 모양의 수렴·분산 정도 등이 설명되었다. 수치실험에서는 표 1의 인자들을 변화시켜서 총 18 경우를 조사하였다. 수치실험에서는 4가지의 서로 다른 경사면의 단면모양을 사용하였으며, 표 1에 A, B, C, D의 알파벳으로 정의되었으며 그림 2에 각각의 단면모양을 보여주고 있다. 수치모의에 사용된 그림 2의 4가지의 사면모양의 선정은 경사면의 대표적인 사면모양 들을 제시한 Hewlett (1982), Ritter(1986)에 근거한다. 그리고 그림 2에서는 모의에 사용된 경계조건도 함께 설명되어 있다.

수치실험에서는 경우 1-4에서는 사면모양이 A 사면에서 다른 모든 인자 들을 고정시킨채, 경사면의 기울기만을 조정하였다. 경우 5-6에서는 토심만을 변화시켰으며, 다른 변수 값들은 경우 1과 같

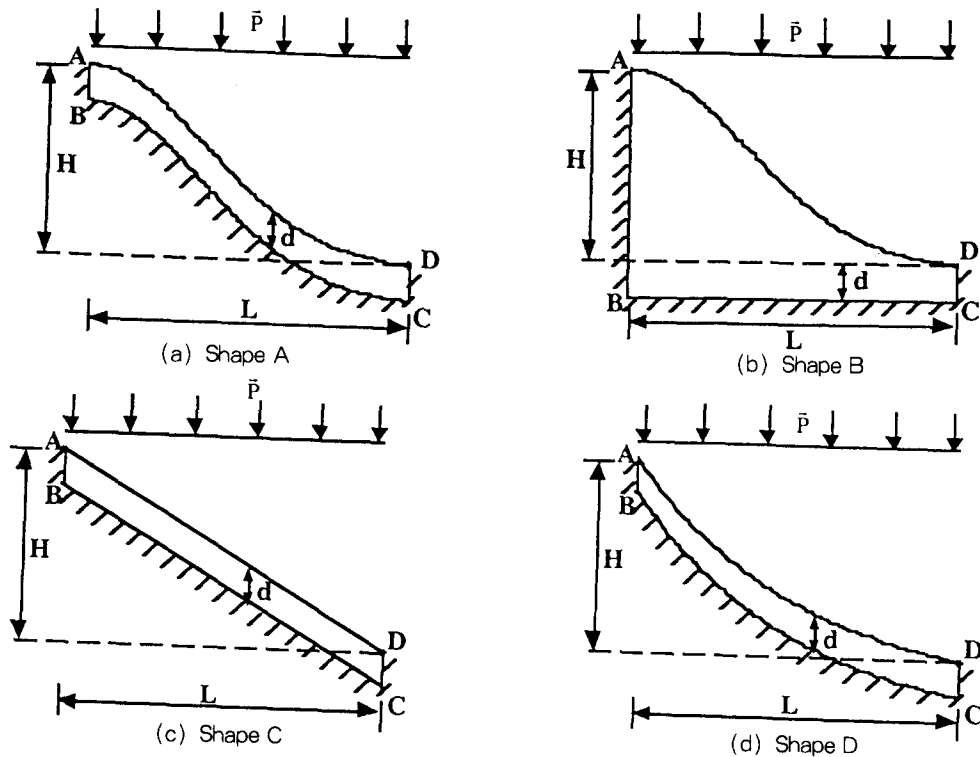
았다. 경우 7-8은 C와 D의 단면모양을 각각 사용하여, 사면 단면모양의 변화가 지표포화지역-중간류유출-흡수분저류량 관계에 미치는 영향을 조사하였다. 경우 9-10에서는 B의 경사면에서 평평한 기반암을 저하시켜서 저류용량의 역할을 조사하였다. 경사면 B는 경사면 A와 지표지형모양은 같지만, 기반암 지형모양 및 저류용량이 다르다.

토양종류의 역할에 대한 조사는 경우 11-13에서 연구되었다. 이 경우들에서는 Plainfield sand, Yolo clay, Touchet silt loam G.E.3 등의 3종류의 토양을 사용하였으며, Guelph loam 토양을 가정한 경우 1의 모의결과와 비교할 수 있다. 이들 4 종류의 흙에 대한 흙의 수리학적 성질들은 Elrick 등(1990)과 van Genuchten(1980)으로부터 채택하였다. Guelph loam, Plainfield sand, Yolo clay 경우들의 불포화투수계수의 관계식은 아래와 같다.

표 1. 정상류 모의 경우

case	cross section geometry	plan geometry	H/L	d/L	soil type	ρ/L
1	A	parallel	0.25	0.025	Guelph Loam	∞
2	"	"	0.1	"	"	"
3	"	"	0.4	"	"	"
4	"	"	0.7	"	"	"
5	"	"	0.25	0.01	"	"
6	"	"	"	0.04	"	"
7	C	"	"	0.025	"	"
8	D	"	"	"	"	"
9	B	"	"	"	"	"
10	"	"	"	0.1	"	"
11	A	"	"	0.025	Plainfield Sand	"
12	"	"	"	"	Yolo Clay	"
13	"	"	"	"	Touchet Silt Loam G.E.3	"
14	A	hollow	0.25	0.025	Guelph Loam	1
15	"	"	"	"	"	2
16	"	spur	"	"	"	1
17	"	"	"	"	"	2
18	A	parallel	"	"	"	∞

Note : L=slope length=100m, H=slope height, d=soil depth, ρ =radius of curvature



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

그림 2. 단면모양 및 경계조건

(\bar{P} =강우벡터, \bar{q} =중간류 속도 벡터, \bar{n} =지표면에 수직인 단위벡터, ψ =토양수 압력수두)

$$K(\psi) = K_s \exp(\alpha\psi) \quad (4)$$

그리고 Touchet Silt Loam G.E.3에 대한 불포화투수계수는 다음과 같이 정의된다.

$$K(\psi) = \frac{K_s - (1 - (\alpha\psi)^{n-1} (1 + (\alpha\psi)^n)^{-m})^2}{(1 + (\alpha\psi)^n)^{m/2}} \quad (5)$$

Guelph loam, Plainfield sand, Yolo clay에 대한 비수분용량 함수는 다음과 같이 정의되며,

$$C(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \frac{p_1 p_2 p_3 |\psi|^{p_3-1}}{(p_2 + |\psi|^{p_3})^2} \quad \psi < 0 \quad (6)$$

Touchet Silt Loam G.E.3의 비수분용량 함수는 아래와 같다.

$$C(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \frac{-am(\theta_s - \theta_r)}{1-m} \Theta^{1/m} (1 - \Theta^{1/m})^m \quad \psi < 0 \quad (7)$$

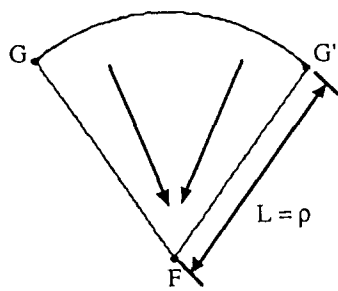
표 2. $C(\psi)$ 와 $K(\psi)$ 관계식의 상수값

(a) Elrick 등(1990)

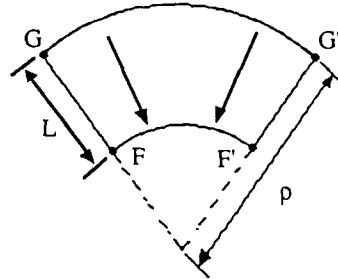
soil type	$K_s(\text{m/hr})$	θ_s	$\alpha(1/\text{m})$	P_1	P_2	P_3	P_4
Guelph Loam	0.013212	0.523	3.36	0.243	0.421	2.0	0.28
Plainfield Sand	0.12384	0.477	13.06	0.377	0.00154	4.0	0.1
Yolo Clay	0.0004428	0.499	1.88	0.259	0.609	1.5	0.24

(b) van Genuchten(1980)

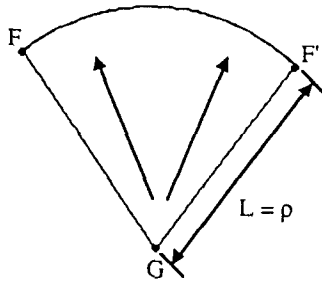
soil type	$K_s(\text{m/hr})$	θ_s	θ_r	a	n
Touchet Silt Loam G.E.3	0.12625	0.469	0.19	0.234	0.421



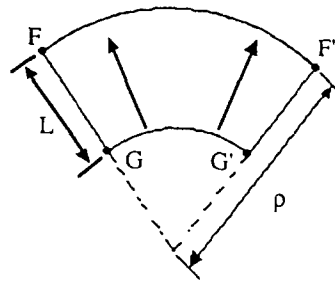
(a) Case 14



(b) Case 15



(c) Case 16



(d) Case 17

그림 3. 수렴(Hollow)와 분산(Spur) 경사면의 평면모양

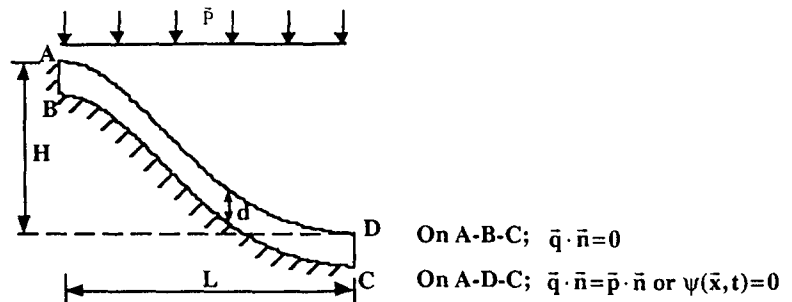


그림 4. 경우 18의 단면모양과 경계조건

(\bar{P} =강우벡터, \bar{q} =중간류 속도 벡터, \bar{n} =지표면에 수직인 단위벡터, ψ =토양수 압력수두)

이 식에서 θ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\theta = \left[\frac{I}{I + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad (8)$$

이들 함수에서 $m=1-1/n$ 으로 정의되며, 함수에 나타난 상수($\alpha, P_2, P_3, P_4, P_5, a, n$)들의 값은 표 2에 요약되어 있으며, K_s 는 포화투수계수, θ_s 는 포화함수비를 의미한다.

평면지형모양의 수렴 또는 분산의 효과가 경우 14-17에서 조사되었다. 이 경우들에서 단면모양 뿐만 아니라 모든 변수들의 값들은 경우 1과 같았다. 그림 3은 경우 14-17의 수치실험에 사용된 수렴사면(hollow)와 분산사면(spur)의 평면모양을 보여주고 있다. 이들 경우에서 지형분산 또는 지형수렴의 정도는 변수(ρ/L)에 의해 조정되었으며, ρ 은 곡률반경을 의미하며, L 은 경사면의 길이를 의미한다. ρ/L 의 범위는 $1-\infty$ 이다. $\rho/L=\infty$ 는 평행사면의 경우처럼 곡률반경이 무한대로 커지거나 또는 사면의 길이가 0으로 접근할 경우를 의미하게 되며, $\rho/L=1$ 의 경우에는 하천 또는 분수령(divide)이 한 점으로 수렴된다. 각각의 수렴 또는 분산 사면에 대하여 $\rho/L=1, 2$ 두 경우가 조사되었다.

그림 4에 보여진 것처럼, 경우 18은 경계조건의 변화를 조사하였다. 하천근처에서 대칭경계조건 대신에 침윤면 경계조건을 적용하였으며, 경사면의 모양을 포함하여 모든 매개변수 값들은 경우 1과 같았다.

4. 수치실험 결과의 검토 및 분석

4.1 지표포화지역-중간류유출 관계

그림 5는 Richards 방정식을 이용하여 정상류 모의를 하여 얻은 지표포화지역-중간류유출 관계에 대한 지형적 성질 및 토양 변화의 영향을 종합적으로 보여주고 있다. 가로축은 중간류유출(Q)을 사면길이(L), 사면지표면적(A), 포화투수계수(K_s), 토심(d), 사면높이(H) 등으로 무차원화한 중간류유출(θ)을 나타내며, θ 는 다음과 같이 정의

된다.

$$\theta = (Q * L^2) / (A * K_s * d * H) \quad (9)$$

세로축도 역시 지표포화지역(SSA)을 사면지표면적(A)으로 무차원화한 지표포화지역(σ)을 의미하며, σ 는 다음 식에 의해 정의한다.

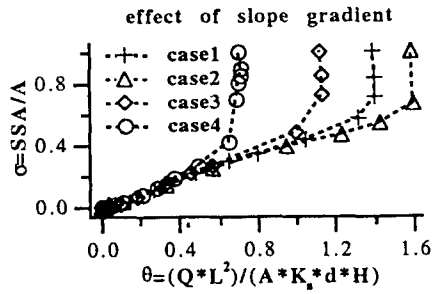
$$\sigma = SSA / A \quad (10)$$

그리고 무차원 지표포화지역(σ)은 0-1 사이의 범위를 나타낸다.

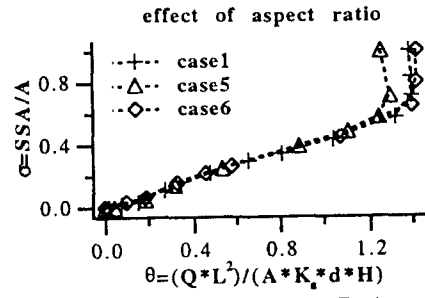
그림 5에서 알 수 있는 것처럼 일반적으로 무차원 지표포화지역(σ)-중간류유출(θ) 관계는 비선형을 보이고 있다. 경우 1-4의 모의 결과를 비교하면, 무차원 중간류유출 값이 0.6 미만일 때는 사면경사도(H/L)의 변화에 관계없이 무차원 지표포화지역-중간류유출 관계는 거의 일치하고 있다. 그러나 중간류유출 값이 0.6 이상일 때는 무차원 지표포화지역-중간류유출 관계는 경사도에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 토양깊이의 변화에 대한 모의 결과(경우 1, 5, 6)를 비교하면 무차원 지표포화지역-중간류유출 정상류 관계는 토양깊이에 관계없이 거의 일치하였다.

경우 1, 7, 8 모의결과와 비교에서 알 수 있듯이 무차원 지표포화지역-중간류유출 관계는 경사면 모양의 변화에 따라 많은 차이를 나타내며, 관계의 모양도 유사성을 보이지 않는다. 따라서 지표포화지역-중간류유출 관계의 모양과 크기는 경사면의 단면모양에 큰 지배를 받게됨을 수치실험은 보여주고 있다. 사면모양 A(경우1) 또는 사면모양 D(경우8)의 모의결과와 비교할 때, 사면모양 C(경우7)는 지표포화지역의 확장이 적게 일어난다.

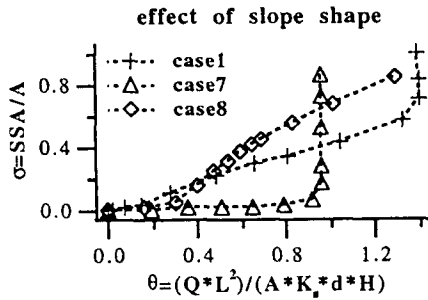
사면저류용량의 효과는 경우 1, 9, 10의 모의결과를 비교함으로써 알 수 있다. 경우 9와 경우 10은 무차원 지표포화지역-중간류유출 관계가 거의 일치하지만, 저류용량이 적은 경우 1과는 지표포화지역-중간류유출 관계가 약간 다름을 수치실험은 보여주고 있다. 따라서 지표포화지역-중간류유출 관계는 사면저류용량의 변화에 따른 영향을 약간 받게 된다.



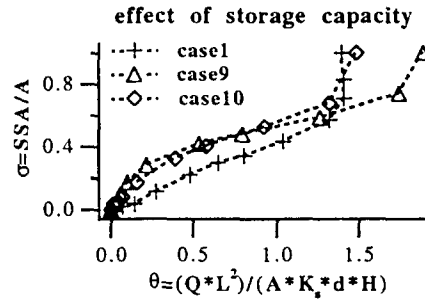
(a) Effect of Slope Gradient



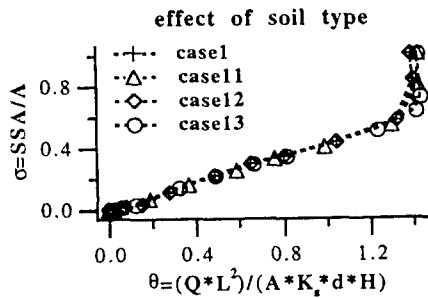
(b) Effect of Aspect Ratio



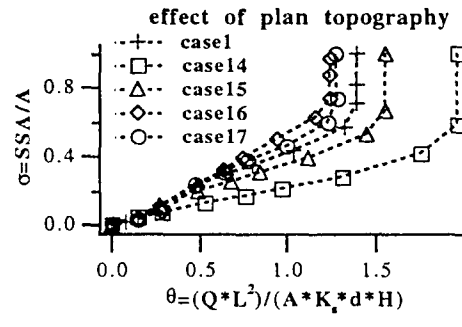
(c) Effect of Slope Shape



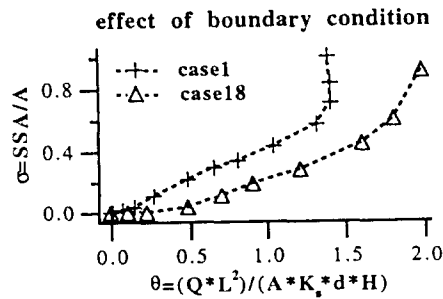
(d) Effect of Storage Capacity



(e) Effect of Soil Type



(f) Effect of Plan Topography



(g) Effect of Boundary Condition

그림 5. 지표포화지역(σ)-중간류유출(θ) 관계

무차원 지표포화지역-중간류유출 관계에 대한 토양종류의 영향은 경우 1, 11, 12, 13의 모의결과와 비교에서 알 수 있듯이, 무차원 지표포화지역-중간류유출 관계는 토양종류에 관계없이 거의 불변함을 수치실험은 보여주고 있다.

경사면 평면지형 분산 또는 수렴의 효과는 지표포화지역-중간류유출 관계의 모양은 비슷하며, 관계의 크기는 조금 변화됨을 알 수 있다 (경우 1, 14, 15, 16, 17 비교). 중간류유출이 일정하면, 수렴정도가 큰 경사면이 수렴정도가 적은 경사면보다 지표포화지역의 확장이 크게되고 있다. 그리고 지하수유출이 일정하면, 분산정도가 큰 경사면이 적은 사면보다 지표포화지역의 확장이 적게되고 있음을 알 수 있다.

하천계곡 근처에서 경계조건의 변화에 따른 효과는 무차원 지표포화지역-중간류 유출 관계의 모양과 크기가 약간 다름을 모의실험은 보여주고 있다. 대칭경계조건 대신에 침윤조건의 사용은 중간류유출의 양이 적을때는 지표포화지역의 확장이 적게 일어나며 중간류유출이 증가함에 따라 점진적으로 증가하고 있다. 그리고 중간류유출량이 같으면, 대칭경계조건보다 침윤조건 상태에서 지표포화지역의 확장이 적게되고 있다.

수치실험한 모든 경우들의 무차원 지표포화지역(σ)-중간류유출(θ) 관계에 대한 멱법칙($\theta = a \theta^b$)을 결정하기 위하여 각 경우에 대한 회귀분석을 통하여 상수 a와 b를 결정하여 표 3에 요약하였다. 그리고 상수 a와 b의 결정방법은 다음과 같다. 멱법칙의 양변을 로그변환하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\log \sigma = \log a + b \log \theta \quad (11)$$

위 식에 $\log \sigma = Y$, $\log \theta = X$, $\log a = Z$ 로 치환하면, $Y = Z + b X$ 로 변환된다. 따라서 선형회귀분석을 이용하여 상수 Z와 b를 결정후, 상수 a는 $a = 10^Z$ 의 관계를 이용하여 결정한다. 표 3에 요약된 상수 a의 평균값은 0.53, 표준편차는 0.233이고, 상수 b의 평균값은 1.432, 표준편차는 0.522이다. 그림 6은 상수 a와 b의 평균값을 사용한 멱법칙과 수치실험한 18경우들의 지표포화지역-중간

류유출 관계들을 보여주고 있다. 그림 6에 사용된 실선의 멱함수는 다음과 같다.

$$\sigma = 0.53\theta^{1.432} \quad (12)$$

그림 6에는 총 201개의 점이 있으며 각 점은 한 모의수행을 나타낸다. 무차원 지표포화지역-중간류유출 관계는 특정한 형태를 보이지 않고 큰 분산을 보여주고 있다. 상수 a와 b의 평균값을 사용하여 결정된 멱법칙은 지형, 토양종류, 경계조건 등의 변화에 관계없이 산지경사면에서 발생하는 지표포화지역을 무차원 중간류유출의 함수로 나타내며, 지표포화지역-중간류유출의 평균관계를 이론적으로 설명하는 식으로 해석할 수 있다. 그리고 미계측구역에서 지표포화지역의 발생과 크기를 추정하고 예측하는 모형화 및 가설을 성립하는데 유용하게 사용될 수도 있다.

표 3. 회귀분석으로 결정된 멱법칙($\sigma = a \theta^b$)의 상수값

경우	a	b
1	0.481	1.240
2	0.429	1.162
3	0.656	1.476
4	1.226	1.700
5	0.521	1.461
6	0.493	1.096
7	0.236	2.929
8	0.821	2.041
9	0.633	0.775
10	0.631	0.792
11	0.476	1.226
12	0.484	1.243
13	0.464	1.220
14	0.26	1.124
15	0.414	1.100
16	0.587	1.609
17	0.546	1.421
18	0.187	2.155

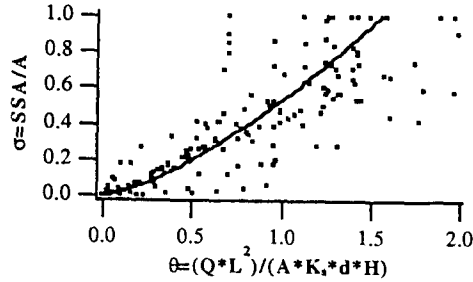


그림 6. 지표포화지역(σ)-중간류유출(θ) 관계와 멱법칙(실선: $\sigma = 0.53\theta^{1.432}$)

4.2 지표포화지역-흡수분저류량 관계

수치실험에서 함수비를 적분하여 토양수분저류량을 결정함으로써 무차원 지표포화지역-흡수분저류량 관계를 결정하였다(그림7). 그림 7에서 점들은 모의를 하여 획득한 지표포화지역-흡수분저류량 관계이며 실선은 이 관계에 적합한 멱법칙을 보여 주고 있다. 이 그림에서 세로축은 사면지표면적으로 무차원화된 지표포화지역(σ)을 나타내며, 가로축도 역시 무차원화된 흡수분저류량(ϕ)을 의미하며, ϕ 는 다음 식에 의해 정의된다.

$$\phi = (V - V_r) / (V_m - V_r) \quad (13)$$

이 식에서 V_r 는 잔유수분저류량을 나타내며 정수압 상태에서의 흡수분저류량을 의미하며, V_m 는 포화수분저류량을 의미하며 사면이 완전히 포화된 상태를 의미한다.

그리고 4.1절과 동일한 방법의 회귀분석을 통하여 얻은 멱법칙의 상수 a와 b를 표 4에 요약하였으며, 상수 a의 평균값은 0.845, 표준편차는 0.142이고, 상수 b의 평균값은 2.644, 표준편차는 0.923이다. 그림 7은 상수 a와 b의 평균값을 사용한 멱법칙과 수치실험한 모든 경우들의 지표포화지역-흡수분저류량 관계들을 보여주고 있으며, 그림 7에 사용된 실선의 멱함수는 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma = 0.845\phi^{2.644} \quad (14)$$

그림 7에서 알 수 있는 것처럼 무차원 지표포화지역-흡수분저류량 관계들은 지형특성, 토양종류, 경계조건 등의 변화에 관계없이 일정한 규칙과 유사성을 보여 회귀분석을 통하여 얻은 멱법칙은 좋은 상관관계를 보여 지표포화지역-흡수분저류량 관계의 추정에 이용될 수 있다.

표 4. 회귀분석으로 결정된 멱법칙($\sigma = a \phi^b$)의 상수값

경우	a	b
1	0.832	2.387
2	0.796	1.985
3	0.903	2.842
4	0.841	3.310
5	0.804	3.084
6	0.841	2.047
7	0.606	4.609
8	1.296	3.860
9	0.829	1.669
10	0.742	1.513
11	0.849	1.770
12	0.849	1.770
13	0.828	2.322
14	0.662	2.563
15	0.778	2.279
16	0.979	2.519
17	0.917	2.524
18	0.862	4.535

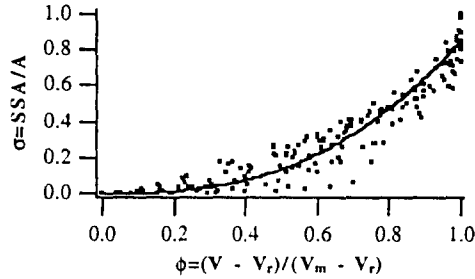


그림 7. 지표포화지역(σ)-홍수분저류량(ϕ) 관계와 멱법칙 (실선: $\sigma = 0.845\phi^{2.44}$)

5. 결론 및 요약

지표포화지역-중간류유출 관계와 지표포화지역-홍수분저류량 관계들의 경험적 관계를 성립하고, 지형 및 토양 특성이 이들 관계에 미치는 효과를 이해하기 위하여 Richards 방정식을 이용하여 수치실험을 하였다. 경사면의 지형인자 및 토양의 수리 특성으로 무차원화된 지표포화지역-중간류유출 관계의 모양과 크기는 지형인자 및 흙의 특성에 따라 변하고 있다. 특히 이 관계의 모양은 경사면의 단면 모양에 의해 많은 영향을 받고 있다. 그리고 무차원화된 지표포화지역-중간류유출 관계는 토양 깊이와 흙의 종류에 관계없이 거의 불변하다는 가설을 수치실험의 결과로부터 유추할 수 있다. 무차원화된 지표포화지역-중간류유출 관계에 회귀분석을 적용하여 각각의 수치실험 경우에 대한 멱법칙을 유도하였다. 멱법칙은 두 개의 경험상수를 포함하며, 경험상수들의 평균치를 사용하여 유도된 멱법칙(식12)은 지형 및 토양수리 특성의 변화에 따른 지표포화지역-중간류유출 관계의 모든 변화를 설명하지는 못하지만, 유역평균 지표포화지역-중간류유출 관계의 추정에 유용하게 응용될 수 있다고 사료된다.

수치실험을 통하여 얻은 무차원화된 지표포화지역-홍수분저류량 관계의 모양과 크기는 비교적 규칙적인 양상을 보였다. 따라서 무차원화된 지표포화지역-홍수분저류량 관계들로부터 획득한 멱법칙(식14)은 지형인자 및 토양종류 등의 변화에 관계없이 무차원 지표포화지역(σ)-홍수분저류량(ϕ) 관계를 잘 설명하고 있다. 그러므로 물리적 모형을

사용하여 본 연구에서 이론적으로 유도된 지표포화지역-홍수분저류량 관계에 대한 멱법칙은 이 관계의 추정에 유용하게 사용될 수 있다.

본 연구에서는 지표포화지역과 수문인자사이의 평형 또는 정상류 관계의 유도에 역점을 두었다. 현장실험을 통한 평형적 관계의 유도는 거의 불가능하기 때문에 물리적 모델을 이용한 평형관계의 유도가 유일한 방법이며, 정상류 관계의 확립은 지표포화지역, 중간류유출, 홍수분저류량들을 묘사하는 동력계 모형을 개발하고 이들 수문인자들의 동적 관계를 이해하기 위하여 선행되어야 할 기초연구로써 그 의의가 있다고 사료된다. 그리고 자연상태의 경사면에서는 토양의 수리성질이 공간적으로 변화하기 때문에 흙의 수리학적 성질의 이질성 및 이방성의 영향에 대한 연구를 향후에 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- Beven, K.J. (1977). "Hillslope hydrographs by the finite element method." *Earth Surface Processes*, Vol. 2, pp. 13-28.
- Beven, K.J., and Kirkby, M.J. (1979). "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.
- Dunne, T., and Black, R.D. (1970a). "An experimental investigation of runoff production in permeable soils." *Water Resources Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 478-490.
- Dunne, T., and Black, R.D. (1970b). "Partial area contributions to storm runoff in a small

- New England Watershed." *Water Resources Research*, Vol. 6, No. 5, pp. 1296-1311.
- Dunne, T., Moore, T.R., and Taylor, C.H. (1975). "Recognition and prediction of runoff producing zones in humid regions." *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 20, No. 3, pp. 305-327.
- 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.
- Gburek, W.J. (1990). "Initial contributing area of a small watershed." *Journal of Hydrology*, Vol. 118, pp. 387-403.
- 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.
- O'Loughlin, E.M. (1981). "Saturation regions in catchments and their relations to soil and topographic properties." *Journal of Hydrology*, Vol. 53, pp. 229-246.
- O'Loughlin, E.M. (1986). "Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis." *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 5, pp. 794-804.
- 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)