

1. 서론

습윤-온대 지역의 산악지 경사면에서 지표유출은 하천부근의 지표포화지역(Surface Saturation Area)으로부터 초래되고, Horton 지표류는 거의 볼 수 없음을 현장실험을 통하여 보인 바 있다(Dunne, 1978; Dunne and Black, 1970). 지표포화지역은 침식기준면 또는 사면 저지대 하천 주위의 지표면이 포화된 지역으로 강우동안 확장되거나 또는 강우가 그친 후에 감소하면서 동적 변화를 하고 있다. 이 현상은 Hewlett and Nutter(1970)가 제안한 "variable source area" 개념의 본질이며, 지표포화지역같은 유출원 지역의 동적 특성을 설명하기 위하여 제안되었다.

일반적으로 침투되는 물에 의해 지하수위가 상승되고, 계곡에 위치한 하천 근처에서는 지하수위가 지표면 가까이에 존재하므로, 지표면이 상승하는 지하수위에 의해 쉽게 포화된다. 그리고 지표포화지역에 떨어지는 강우는 침투가 되지않고 지표유출이 되어 하천유량에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 지표포화지역의 발생과 크기를 예측하는 것은 河川流水의 흐름을, 체적, 침투유량, 침투시간, 경사면에서의 용질유하시간을 예측하는데 중요한 의미를 가진다.

본 연구의 목적은 지표포화지역과 기저유출사이의 동적 관계를 이해하고, 매개변수의 변화에 따른 지표포화지역 및 기저유출의 민감도를 조사·이해하는데 있다. 그리고 연구의 궁극적인 목표는 지표포화지역의 동적 반응을 모형화하고 실험하는데 필요한 가설 또는 간단한 모형을 개발하는데 있다. 본 연구의 접근방법으로 물리학에 기초한 모델의 수치실험을 통하여, 모델에 포함된 매개변수와 강우강도의 값을 변화시킴으로써 지표포화지역과 기저유출의 반응 시계열을 획득하여 지배인자에 대한 민감도와 동적 관계를 해석하였다.

2. 수치 모의 해석

2.1 불포화-포화 흐름 이론

본 연구의 수치실험에 사용된 지배방정식은 Richards 방정식이다 (Richards, 1931). Richards 방정식은 불포화-포화 다공성 매질에서의 흐름을 묘사하며 다음과 같이 표현된다.

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

위의 방정식에서 $C(\psi) = \partial \theta / \partial \psi$ 는 비수분용량(specific moisture capacity), $K(\psi)$ 는 불포화투수계수, ψ 는 토양수 압력수두, z 는 위치수두로서 정의된다.

Richards 방정식을 풀때 초기-경계 조건들 뿐만 아니라 $C(\psi)$ 와 $K(\psi)$ 에 대한 함수도 반드시 제공되어야 한다. 본 연구에서는 주어진 초기-경계조건 문제를 유한요소 프로그램인 FEMWATER(Yeh, 1987)를 이용하여 Richards 방정식의 해를 구하였다.

2.2 흙의 수리성질

일반적으로 흙의 수리학적 성질들은 흙의 특성에 따라 변한다. 본 수치실험에서는 Guelph loam과 Plainfield sand가 가정되었으며, 이들 토양에 대한 수리학적 성질들은 Elrick et al.(1990)에 의해 발표된 자료들을 사용하였다. 불포화투수계수, $K(\psi)$, 에 대한 함수관계는 다음과 같이 표현된다.

$$K(\psi) = K_s, \quad \psi \geq 0$$

$$K(\psi) = K_s \exp(\alpha\psi) \quad \psi < 0$$

이 식에서 K_s 는 포화투수계수이고 α 는 변수이다.

- 1) 경희대학교 토목공학과 강사
- 2), 3) 경희대학교 토목공학과 교수

그리고 비수분용량 함수, $C(\psi)$, 는 다음과 같이 표현된다.

$$C(\psi) = \frac{d\theta}{d\psi} = 0 \quad \psi \geq 0 \quad \psi \geq 0$$

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

$C(\psi)$ 와 $K(\psi)$ 에서 사용된 변수들의 값은 표1에 요약되어 있다.

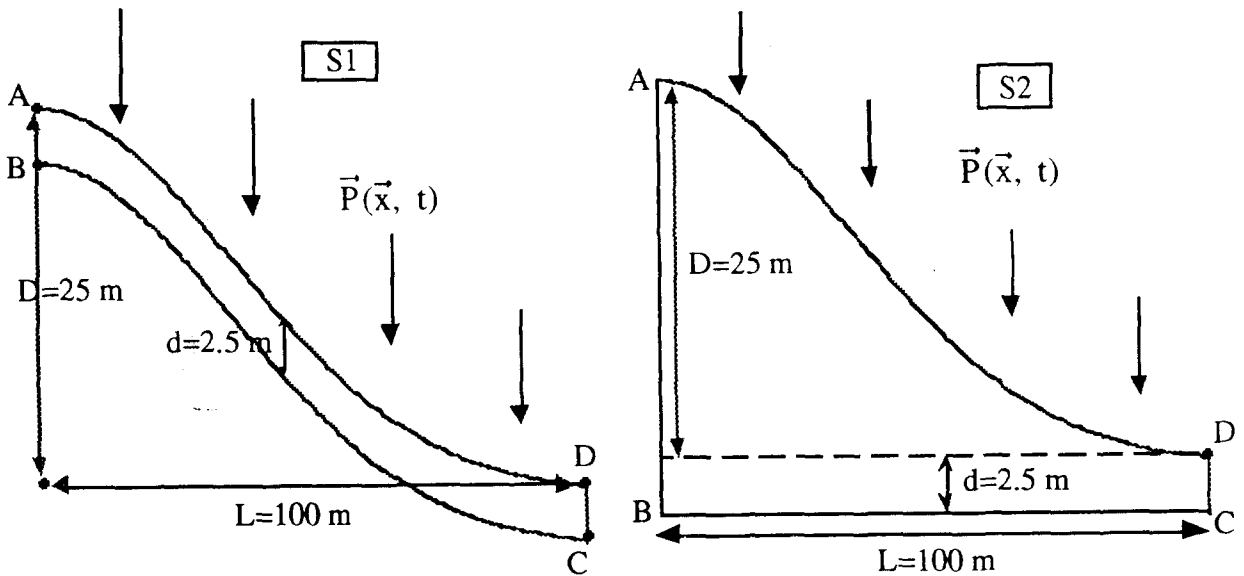
표1. $C(\psi)$ 와 $K(\psi)$ 에 사용된 변수값.

soil type	K_s (m/hr)	θ_s	α (1/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

2.3 경계조건 및 모의모양

그림1은 모의되는 영역의 기하학적 모양과 경계조건을 보여주고 있다. 그림 1의 경계조건에서 \bar{q} 는 지하수 흐름 벡터이고, \bar{n} 는 경계면에 수직인 단위벡터, \bar{p} 는 경사면에 유입되는 강우벡터를 나타내고 있다.

그림1에서 경계면 A-B-C-D를 따라서는 no flow 경계조건을 사용하였으며, 이에 대한 물리적 의미는 B-C 경계면 밑에는 불투수층이 자리잡고 있으며, A-B와 C-D 경계면은 대칭경계조건을 의미하게 된다. 계곡의 얇은 시냇물을 나타내기 위하여 점 D에서는 대기압을 유지하였다. 지표표면 A-D 경계면에는 흐름경계조건 또는 침윤경계조건이 사용되어진다. 그러나 침윤면의 위치를 미리 알 수 없으므로, 침윤면의 위치는 Richards 방정식의 해의 풀이 과정에서 결정되어진다.



on the boundary A-B-C-D: $\bar{q} \cdot \bar{n} = 0$

at the point D: $\psi = 0$

on the boundary A-D: $\bar{q} \cdot \bar{n} = \bar{P} \cdot \bar{n}$ or $\psi(\bar{x}, t) = 0$

그림1. 경사면의 모의영역과 경계조건.

3. 결과의 분석

3.1 기본모의의 동적 반응

기본 모의에 선택된 강우형은 지속기간이 16시간이고 최대강도가 0.0079 m/hr인 사인파 (sine wave) 모양을 가진 강우이다 (그림 2). 흙의 두께가 일정한 사면모양 S1가 기본 모의에 사용되었다 (그림1). 그리고 경사면의 기반토로서 Guelph loam 흙을 가정하였다. 이 경우에 대한 초기조건으로서 2.6424×10^{-5} m/hr의 강우강도를 이용하여 정상류 모의를 하여 얻은 함수비 분포를 사용하였다.

그림 3은 모의결과를 보여주고 있다. 지표포화지역과 기저유출의 반응은 강우기간동안 급격한 상승을 하고 있으며, 두 시계열들의 반응은 相似함을 보여주고 있다. 강우기간동안 지표포화지역과 기저유출의 반응 time scale은 매우 짧지만, 감수기간동안 두 시계열 반응들의 time scale은 상대적으로 길었다. 그리고 침투지표포화지역은 총사면면적의 약 1/4 이상 확장되었다.

그림 4는 지표포화지역과 기저유출사이의 동적 관계를 보여주고 있다. 동적 경로는 Hysteresis를 나타내며, 시계방향으로 돌아가고 있다. 그림 5는 기저유출과 포화지표류의 비교를 보여주고 있으며, 강우기간동안 기저유출은 포화지표류에 비해 매우 적으며, 침투포화지표류는 침투기저유출의 10배 이상임을 알 수 있다. 따라서 강우기간 동안의 유출수문곡선은 하천 근처의 지표포화지역에 내린 강우로 인한 포화지표류가 유출수문곡선의 대부분을 구성하게 되며, 유출수문곡선에 대한 기저유출의 기여는 微微하였다. 이 사실은 Dunne and Black (1970)에 의해 연구된 현장결과와 일치하고 있다.

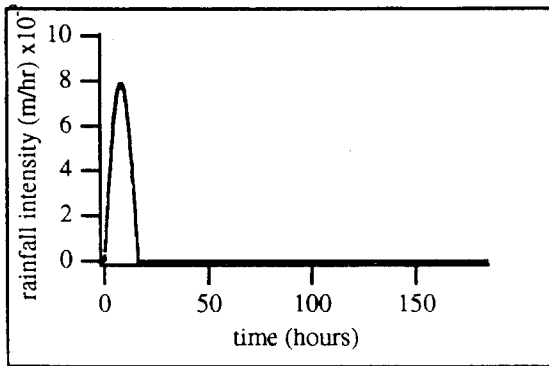


그림2. 기본모의에 사용된 강우형.

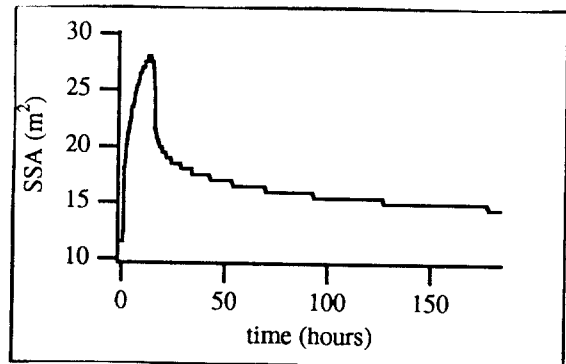
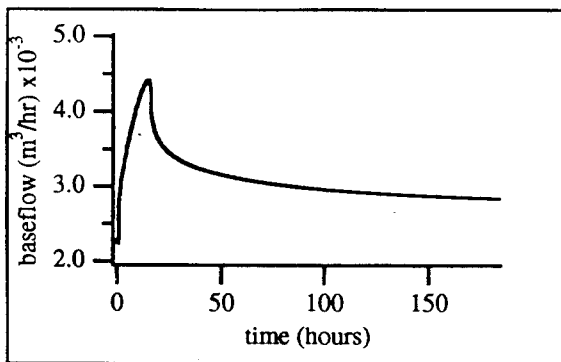


그림3. 기저유출(baseflow) 및 지표포화지역(SSA)의 반응.

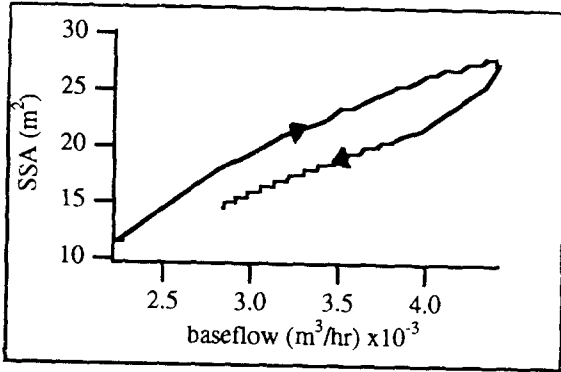


그림4. 기저유출과 지표포화지역(SSA) 사이의 동적 경로.

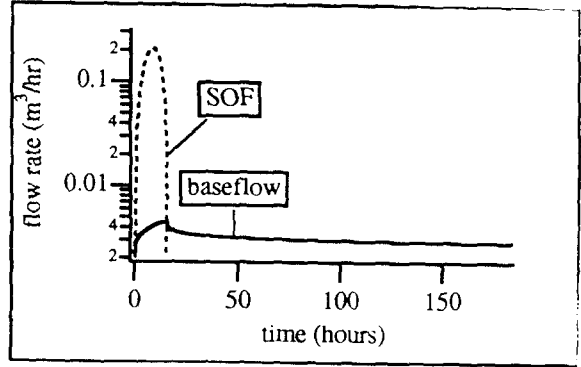


그림5. 포화지표류(SOF)와 기저유출의 비교.

3.2 강우형의 효과

강우량은 같지만 강우유형이 다른 강우를 사용하여 강우유형이 지표포화지역 및 기저유출에 미치는 영향을 조사하였다. 그림 6은 두 모의에 사용된 우량주상도를 보여주고 있다. 두 경우 모두 모의영역으로 그림 1에 주어진 모양 S1가 사용되어 졌다. 그림 6에서 storm1은 기본모의에 사용되었던 우량주상도를 나타내며, storm2는 지속기간이 32 시간으로서 지속기간 및 첨두강우강도 모두 storm1의 두배였다. 두 모의에 사용된 조건들은 강우유형을 제외하고 두 경우에 모두 같았다.

그림 7은 두 모의를 통하여 얻은 반응결과를 보여주고 있다. 두 경우의 강우량은 같고 강우유형이 다르지만, 그림에서 알 수 있듯이 첨두기저유출과 첨두지표포화지역은 두 경우에 거의 동일한 반면에, 첨두시간은 두 경우 일치하지 않았다. storm1에서는 첨두기저유출과 첨두지표포화지역은 비가 그치기 2시간 전에 발생하였으며, storm2에서는 첨두치들이 비가 그치기 5시간 전에 발생하였다.

7일 간의 배수후 기저유출과 지표포화지역의 동적 반응들은 두 경우 모두 일치하였다. 그리고 기저유출과 지표포화지역의 반응유형들은 두 경우 서로 상이하여, 그림 8에서 볼 수 있는 것처럼 지표포화지역과 기저유출의 동적 관계는 상사성을 보이고 있다. 그러므로 이 수치실험들의 결과로부터 폭우의 강우량이 같다면 지표포화지역과 기저유출의 동적 관계는 강우의 유형에 관계없이 불변하다는 가설을 제안할 수 있다.

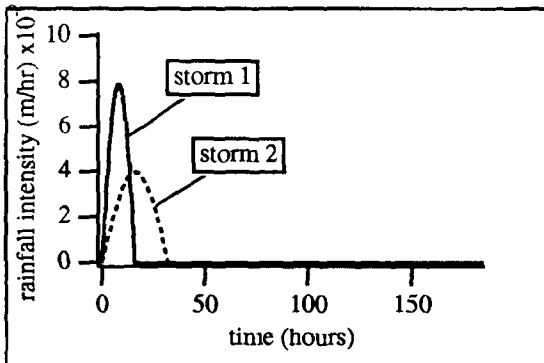


그림6. 강우형의 효과에 사용된 우량주상도.

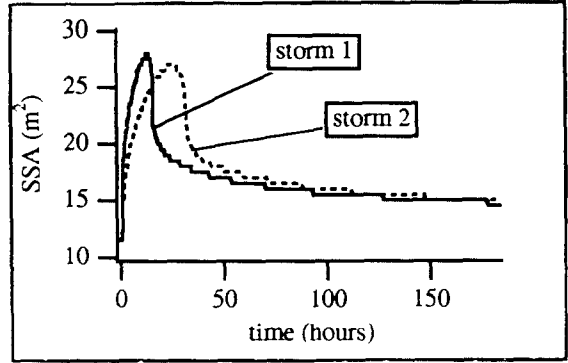
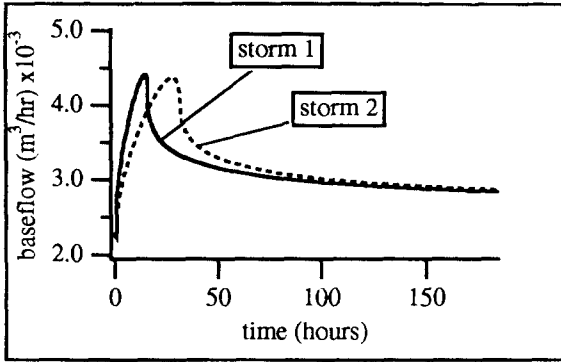


그림7. 기저유출 및 지표포화지역의 반응.

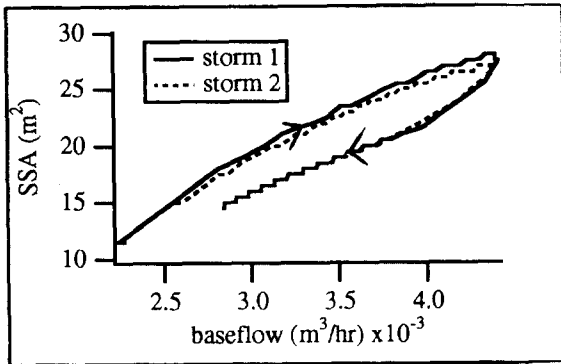


그림8. 기저유출과 지표포화지역사이의 동적 관계.

3.3 토양의 효과

이 단락에서는 흙의 종류를 변화시켜서 흙의 수리 성질들이 지표포화지역 및 기저유출의 동적 반응에 어떤 영향을 미치는 가를 조사하였다. 이 실험들에서 Plainfield sand와 Guelph loam 두 종류의 흙을 사용하였다. 이 실험들에 사용된 경사면의 모양으로 그림1의 S1가 사용되었다. 강우량과 강우유형은 기본 모의에 사용된 것과 같았다. 그리고 흙의 수리학적 성질을 제외한 모든 매개변수 값들은 기본모의 수행과 동일한 값 들을 사용하였다.

그림9는 모의된 지표포화지역과 기저유출의 반응 결과를 보여주고 있다. 그림9에서 알 수 있듯이 Plainfield sand와 Guelph loam사이의 지표포화지역과 기저유출의 반응 들에 큰 차이가 있다. Plainfield sand의 침투기저유출과 침투지표포화지역은 Guelph loam의 침투기저유출과 침투 지표포화지역의 3배 이상임을 보여주고 있다. 그러나 지표포화지역과 기저유출의 침투시간은 모 의에서 조사된 두 흙사이에서 동일하였다. Plainfield sand 경우에 지표포화지역은 주로 하천 근처에 국한되어 있음을 수치실험은 보여주고 있으며, 침투지표포화지역은 총사면지역의 약 6%에 달한다. Plainfield sand와는 대조적으로 Guelph loam에서는 지표포화지역이 위쪽 경사면으로 이동하여 침투지표포화지역은 총사면지역의 15% 이상을 점유하고 있다.

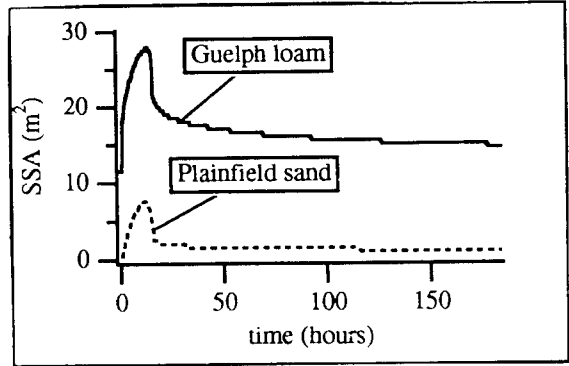
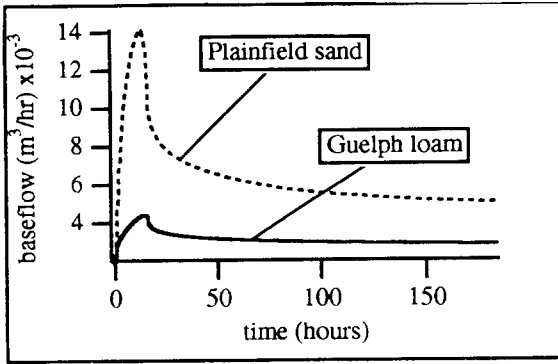


그림9. 기저유출 및 지표포화지역의 반응.

3.4 사면저류용량의 효과

본 절에서는 기저유출과 지표포화지역의 동적 반응에 대한 경사면 저류용량의 효과가 조사되었다. 이 모의 실험들에서는 그림1에 나타난 두 경사면의 모양들이 사용되었다. 기반암이 평평한 모양인 S2는 S1보다 5배의 저류용량을 가지고 있다. 두 경우에 모두 Guelph loam 흙이 사용되었다. 그리고 지표지형학의 모양은 두 경우에 같았다. 강우강도와 강우형태를 비롯하여 모든 매개변수 값들은 기본모의수행 경우와 동일하였다.

그림 10은 기저유출과 지표포화지역 시계열 들의 모의결과를 보여주고 있다. 선행 기저유출이 같은 상태에서 저류용량이 큰 S2사면이 S1사면보다 조금 더 많은 기저유출을 발생시켰다. 그러나 S1사면과 S2사면의 지표포화지역의 크기를 비교하면 S2사면이 더 적게 분포됨을 모의 결과는 보여주고 있다. 따라서 경사면의 저류용량이 클수록 기저유출의 양은 증가되고 지표포화지역은 감소함을 알 수 있다. 지표포화지역 동적 반응의 차이때문에 저류용량이 적은 사면에서는 포화지표류가 증가하여 포화지표류가 유출의 중요한 부분을 구성하게 된다.

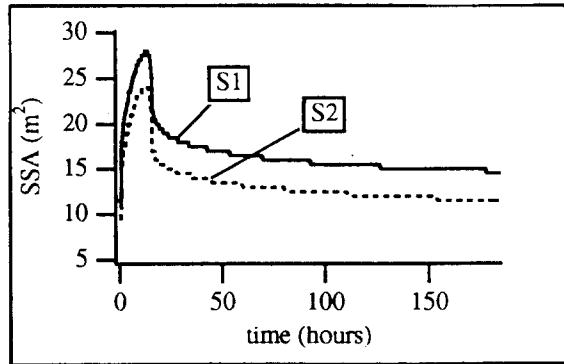
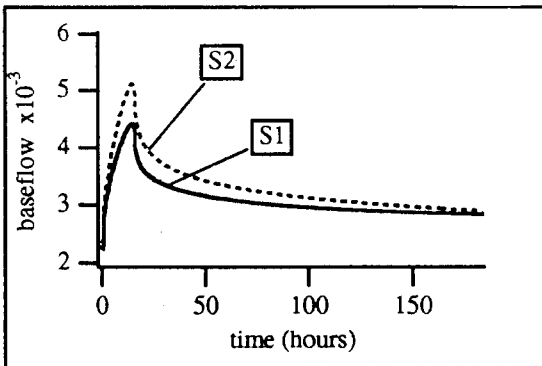


그림10. 기저유출 및 지표포화지역의 반응.

4. 결론 및 토론

이상경사면에서 물리학에 기초한 모형의 모의를 통하여 지표포화지역 및 기저유출의 동적 반응을 조사하였다. 모의에서 통제된 변수중에서 흙의 변화가 지표포화지역과 기저유출의 동적 반응에 가장 민감한 반응을 나타내었다. 그리고 지표포화지역과 기저유출사이의 관계는 비선형 동적 관계를 보이고 있다. 그러므로 물리학에 기초한 모형을 이용하여 유출과 지표포화지역을 추정할 경우 흙의 수리성질 들을 정확히 수치화하는 것이 중요하다고 사료된다.

폭우기간동안의 총유량 수문곡선은 하천근처의 포화지표류에 의해 대부분 구성되며, 반면에 감수기간 동안의 수문곡선은 기저유출에 의해 점유되고 있다. 수치실험 결과는 지표포화지역의 동적 반응은 기저유출의 동적 반응과 밀접한 관계가 있음을 보여주고 있다. 그리고 지표포화지역은 강우의 침투를 막기때문에 경사면의 평균 침투율을 추정하기 위해서는 지표포화지역의 분포를 추정하는 것이 중요하다.

경사면의 불포화대는 흙의 수분 분포와 토양수의 속도를 조정하는데 중요한 역할을 하며, 상승기간과 감수기간사이의 반응 time scale의 차이를 가져오는 역할도 하고 있다고 사료된다. 그리고 경사면에 내린 강우는 대부분 불포화대에 저장되기 때문에, 불포화대는 흙의 수분을 저장하는 저수지의 역할을 한다.

그리고 본 연구에서 수행한 수치실험 결과는 지표포화지역과 기저유출의 동적 반응을 모형화, 해석, 실험하는데 유용할 것으로 생각된다. 본 연구에서 조사된 기저유출과 지표포화지역의 동적 반응들은 다음과 같은 동적 모형을 개발하는데 필요한 예비연구로서 그 의의가 있다고 생각된다.

$$\frac{dV}{dt} = p(A-s) - q$$

$$\frac{ds}{dt} = f(s, q, V)$$

$$\frac{dq}{dt} = g(s, q, V)$$

위 식에서 V는 경사면에 저장된 흙 수분량을 의미하며, p는 강우강도, s는 지표포화지역, A는 경사면의 총면적, q는 기저유출을 의미한다. 이 식에서는 물수지 방정식과 지표포화지역 및 기저유출의 동적 반응을 묘사하는 1차 상미분방정식을 결합하였다. 그리고 앞으로 연구되어야 할 과제는 1차 상미분방정식에 나타난 함수(f와 g) 들을 결정하는데 있다.

5. 참고문헌

- Dunne, T. 1978. Field studies of hillslope flow processes. p. 227-293. In M.J. Kirkby(editor). Hillslope hydrology. New York: John Wiley.
- Dunne, T., and R.D. Black. 1970. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. Water Resources Research 6(2): 478-490.
- Elrick, D.E., W.D. Reynolds, H.R. Geering, and K.A. Tan. 1990. Estimating steady infiltration rate times for infiltrometers and permeameters. Water Resources Research 26(4): 759-769.
- Hewlett, J.D., and W.L. Nutter. 1970. The varying source area of streamflow from upland basins. p.65-83. In Proceedings of the Symposium on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management. American Society of Civil Engineers: New York.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1: 318-333.
- Yeh, G.T. 1987. FEMWATER: A finite element model of water flow through saturated-unsaturated porous media-first revision. ORNL-5567/RI. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. 248p.