

산림수문학(Forest hydrology)의 연구 동향과 앞으로의 과제(1)



김 경 하

임업연구사, 농학박사, 임업연구원 산림수자원연구실
kkyha@foa.go.kr

1. 서론

산림수문학은 산림에서 발생하는 물순환 과정과 물의 양적·질적인 분포를 다루는 학문이다. 산림은 농지나 초지 또는 도시지역과 달리 지형의 기복이 복잡하고 수고(樹高)가 큰 나무로 덮여 있기 때문에 독특한 수문환경을 나타낸다. 예를 들면, 수고가 큰 나무는 최상부 표면의 조도계수가 증가하여 공기동력학적 저항이 작아지기 때문에 표면에 묻은 물이 쉽게 대기 증으로 증발한다. 산림의 높은 증발률은 산림이 타용도로 전용되었을 때 단기적인 유출량의 변화에 큰 영향을 미친다.

또한, 산림토양은 높은 유기물 함량과 뿌리가 썩은 통로, 그리고 큰 공극으로 인하여 모관력에 지배를 받지 않는 집중류(preferential flow)를 발생시킨다. 산림토양에서 발생하는 집중류는 일반적인 Darcy의 법칙을 따르지 않기 때문에 kinematic wave를 이용한 새로운 지배방정식이 필요하다. 이상과 같이 산림에서 발생하는 독특한 수리·수문적 기작은 서로 복잡하게 연관되어 있어서 독립적으로 밝히기가 어려울 뿐만 아니라 전통적인 수문학으로는 해결하지 못하기도 한다.

최근, 대기오염이나 지구온난화와 같은 환경문제는 산림에서 발생하는 수자원의 양적·질적 변화에 큰 영향을 미치고 있다. 산림은 물을 공급해 주는 상수

원지이며 물을 정화하는 자연의 정수기 역할을 한다. 산림유역관리는 하루 하천에 깨끗하고 풍부한 물을 공급하기 위해서 필요하며, 이에 필요한 관리기술은 산림유역에서 발생하는 수리·수문적 기작과 그 과정을 이해해야 개발할 수 있다.

본 내용은 앞으로 수자원과 관련된 산림환경 변화에 대응하기 위해서 필요한 정보로서 산림수문학의 역사적 배경을 짚어보고 최근 제기되고 있는 산림유역의 유출발생 기작을 고찰하였다.

2. 본론

2.1 산림수문학의 역사

수문학은 크게 다루는 대상에 따라 산림수문학(forest hydrology), 농업수문학(agricultural hydrology), 공업수문학(engineering hydrology), 그리고 최근에 각광을 받기 시작한 환경수문학(environmental hydrology)과 기상수문학(meteorological hydrology)으로 구분할 수 있다. 수문학은 고대 이집트에서 시작하였으나, 근대적 수문학은 19세기 말에 태동하였으며, 더불어 산림수문학도 이 시기에 시작되었다.

유럽인들은 오래전부터 산림을 벌채하면 홍수와 토사유출이 증가한다는 사실을 경험적으로 알고 있었다. 최초의 공식적인 산림유역시험은 1900년에 스위스의

Bernese Emmental 지역에서 있었다. 이 시험은 산림과 초지유역에서 홍수유출과 기저유출을 측정했으며, 산림유역이 홍수 및 연유출량은 적은 반면, 기저유출량은 많았다는 결론을 얻었다. 또한, 이 시험은 산림유역이 토사유출량과 산사태 발생률도 적다는 결론을 얻어, 산림의 수원함양 및 토사유출방지능을 처음으로 입증하였다(McCulloch and Robinson, 1993).

미국의 산림유역시험은 1911년 콜로라도주의 Wagon Wheel Gap 시험지에서 공식적으로 처음 시작되었다. 시험은 산림과 개별유역의 유출량을 처리 전 8년, 그리고 개별처리 후 7년간 관측하여 비교하였다. 시험결과는 개별유역의 연유출량이 약 30mm 많았으며 기저유출량도 약간 많았다(Bates and Henry, 1928). 이러한 결과는 이 지역의 강수량의 약 50%가 눈이기 때문에 개별 후 봄철 용설수가 증가한데 기인한다.

1930년대는 현장 위주의 산림유역시험과 더불어 유역의 유출발생을 산정하기 위한 여러 가지 수문이론들이 발전하였다. 대표적인 이론으로 1932년 Sherman은 단위유량도법(unit hydrograph model)을 이용한 홍수량 계산법을 발표하였으며, 이듬해인 1933년 Horton은 그림 1과 같이 침투이론에 의한 유출발생 기작을 발표하였다.

Sherman의 단위유량도법은 집중형 경험모형인데 반해, Horton의 접근 방식은 분리형 물리모형이었다. Horton의 접근방식은 오늘날 산림유역의 수문순환의 각 과정을 분리하여 물리적으로 해석하는 방

법의 바탕을 제공하였다. Horton의 침투이론이 Sherman의 단위유량도법을 잘 설명했기 때문에 20세기 중반까지 농업수문학은 이 두 가지 이론에 의해 주도 되었다(Anderson and Burt 1990). 그러나 이후에 Horton의 이론은 매우 제한적으로 발생하는 기작이며, 특히 산림유역에서는 거의 발생하지 않는다는 사실이 밝혀졌다.

산림수문학은 1940년대 초에 생태학자이자 미국 Coweeta 산림수문연구소를 창설한 Charles Hursh에 의해 크게 발전하였다. Hursh의 초기 연구는 주로 산지 이용이 유출에 미치는 영향이나, 토양 속의 투수 현상, 침식 방지 등이었다. Hursh는 미국 동북부의 Appalachians 산맥에 위치한 산림수문 시험유역 내에서는 Horton이 이론적으로 주장했던 침투초과 지상류(infiltration-excess overland flow)가 거의 발생하지 않는다는 결론을 얻었으며, 이 연구결과는 그림 2와 같은 Hewlett의 동적 유출발생지역(variable source area) 이론이 탄생하는데 큰 공헌을 하였다(Anderson and Burt 1990).

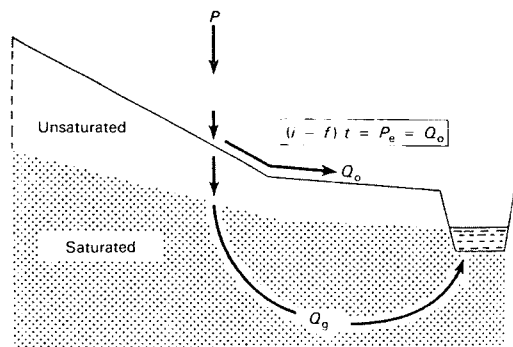


그림 1. Horton의 유출발생 기작이론

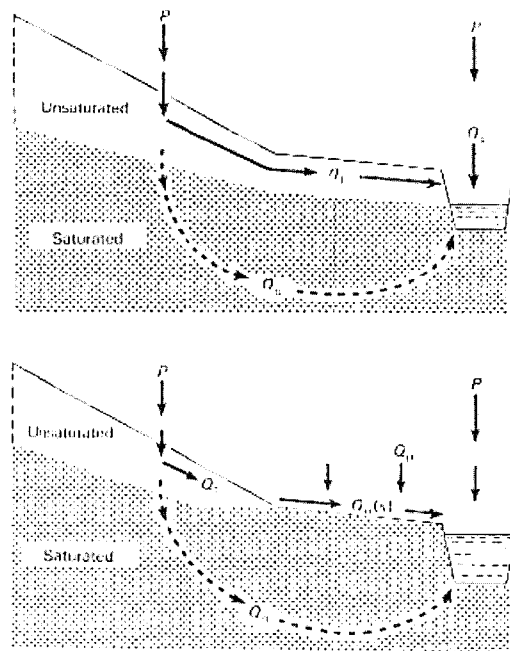


그림 2. Hewlett의 유출발생 기작이론

1960대는 수문학이 개념적 실험적 단계에서 현장 위주의 연구로 탈바꿈하는 시기였다. 특히, 이러한 변화는 공업수문학으로 해결하지 못했던 산림수문학에 큰 발전을 가져왔는데, 이러한 변화는 주로 임학자, 생태학자, 지형 및 지리학자들에 의해서 주도되었다. 환경문제가 대두되면서 사람들의 관심이 단순한 결과보다 내부적인 변화과정에 초점이 맞추어졌으며, 이러한 여건의 변화에 힘입어 많은 연구자들이 세부적인 수문과정(hydrological processes)의 규명에 심혈을 기울였다.

영국 수문연구소(Institute of Hydrology)의 Calder는 1970년부터 현재까지 산림에서 발생하는 증발 현상, 특히 차단손실과정의 세부적인 규명에 공헌한 바가 크다. 그에 의하면 영국에서 차단손실에 관한 연구가 본격적으로 시작된 것은 1956년 Frank Law가 산림의 차단손실이 수자원의 감소를 가져온다는 연구 결과를 발표한 후부터라고 한다. Law의 연구결과는 그 때까지 많은 연구자들이 생각해 왔던 산림과 초지의 증발산량은 거의 같다는 통념을 뒤집는 결과이기 때문에 논란의 대상이 되었다. Law에 의하면 산림지 특히, 침엽수인 가문비나무는 초지보다 연간 약 290mm의 증발산량이 많기 때문에 전체 시험유역을 침엽수로 조립할 경우 약 42%의 수자원이 감소할 것이라고 예측하였다.

많은 논란 때문에 영국 정부에서는 1968년에 수문조사단을 구성하여 Law의 결과에 대해 검증작업을 시작하였다. 이후 조사단의 결과는 Law의 결론이 맞았으며, 심지어 그가 침엽수림의 차단손실량을 과소평가하였다고 보고하였다. 중요한 것은 이러한 논란의 와중에 실시된 각종 연구결과 덕분에 산림지에서의 차단손실과정이 보다 상세하게 밝혀졌다는 사실이다.

유출분야의 발전과정은 전기한 Hursh와 Hewlett의 이론이 발전을 거듭하여 1964년에 Betson은 유역 내에서 발생하는 침투초과지표면흐름(infiltration-excess overland flow)은 Horton이 주장한 바와 달리 매우 국지적으로 발생한다는 부분적 유출발생 지역 모형(Partial Area Model)을 발표하였다. 1978년 영국의 Kirby에 의해 발간된 Hillslope Hydrology는

유출과정을 물리적으로 해석하고자 노력하였으며, 특히 현장 위주의 수문시험의 중요성을 부각시키는데 많은 기여를 하였다. 이 책의 내용 중 대부분은 현재 유역수문학(catchment hydrology)의 최대 과제인 유출과정 중 유출경로(pathways)나 유출성분(runoff source)에 초점이 맞추어져 있다. 1990년에 발간된 Anderson과 Burt의 Process Studies in Hillslope Hydrology는 유역의 유출과정을 토양물리, 지표수 및 지중수, 대공극류 등 유출발생과정을 세부적으로 다루었으며, 최근 발전하기 시작한 유출성분과 수질과의 관계를 개괄적으로 다루고 있다. 최근의 유출발생 기작은 그림 3과 같이 강수가 진행되는 동안 여러 가지 기작들이 복합적으로 발생한다는 설명이 유력하다.

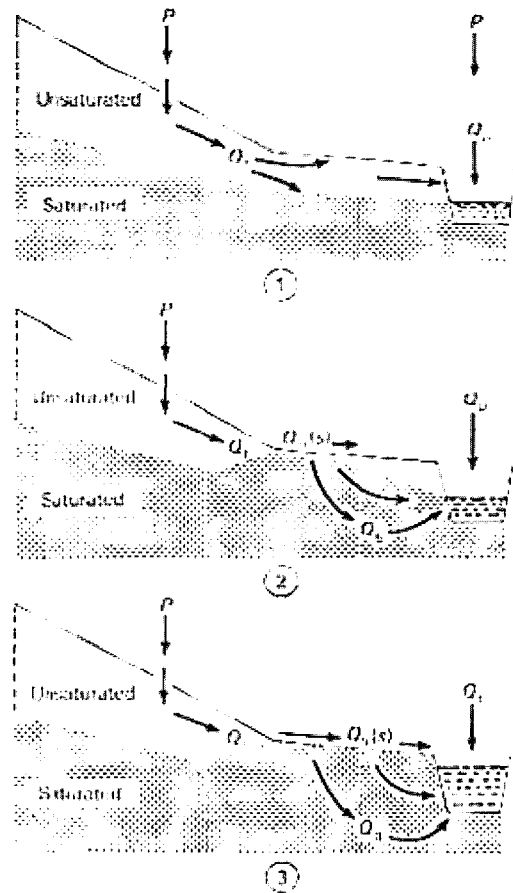


그림 3. 최근의 유출발생 기작이론

현재, 산림수문학은 환경 문제와 연관하여 각 수문 과정을 세부적으로 접근하는 추세이다. 특히, 유역의 유출수가 나타내는 수질의 변동을 짧은 시간 내에 예측하기 위해서는 각 과정에서의 수질변화를 정확히 예측하는 기술이 필요하다. 다른 인자와 같이 수질은 자연계 내에서 매우 큰 변동을 나타낸다. 강우시 유입되는 빗물의 수질은 수관부의 공간적 변이에 의해 강우가 진행되는 동안 큰 폭으로 변화한다. 토양수의 수질은 토양의 물리적 성질에 따라 크게 달라진다. 최근의 연구 결과에 의하면 세공극(micropore)과 조공극

(macropore)의 수질이 서로 다르며, 특정 이온이 특정 공극 크기에서 농도가 높다고 한다. 유출수의 수질은 유역의 수문발생 기작에 의해 크게 좌우되므로 수질을 예측하기 위해서는 유출발생 기작을 정확히 파악해야 한다. 이러한 측면에서 소규모의 토양이나 사면에서의 실험은 유출발생 기작을 반영할 수 없으므로 실제 유역의 수질 변동을 예측하는데 한계가 있으며, 따라서 산림유역수문학(forest watershed hydrology)의 관점에서 이해하는 것이 필요하다.

참고문헌

- Anderson M.G. and Burt T.P.(1990), Process studies in hillslope hydrology, p. 529.
- Barling, R.D., Moore, I.D., and Grayson, R.B.(1994), A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content, *Water Resources Res.*, 30(4), pp. 1029-1044.
- Bates, C.G. and Henry, A.J.(1928), Forest and streamflow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado, *Mon. Weather Rev. Suppl.*, 30, pp. 1-79.
- Beven K.J.(1993), Prophecy, reality, and uncertainty in distributed hydrological modelling, *Advances in Water Resources*, 16, pp. 41-51.
- Eshleman, K.N., Pollard, J.S., and O'Brien, A.K.(1993), Determination of contributing areas for saturation overland flow from chemical hydrograph separations, *Water Resources Res.*, 29(10), pp. 3577-3587.
- Famiglietti, J.S., Wood, E.F., Sivapalan, M., and Thongs, D.J.(1992), A catchment scale water balance model for FIFE, *J. Geophys. Res.*, 97(D17), pp. 18997-19007.
- Goodrich, D.C., Doolen, R.M., and Unkrich, C.L.(1994), Representative elementary area concepts in a semi-arid watershed environment, *Hydrological Processes*, 8, pp. 120-129.
- Marmorek, D.R., Thorton, K.W., Baker, J.P., Bernard, D.P., and Reuber, B.(1986), Acidic episodes in surface waters: state of science, U.S. EPA, Environmental Research Laboratory, Corvallis, Oregon.
- McCulloch J.S.G. and Robinson M.(1993), History of forest hydrology, *J. of Hydrology*, 150, pp. 186-216.
- Moore, I.D. and Grayson, R.B.(1991), Terrain-based prediction of runoff with vector elevation data, *Water Resources Res.*, 27(6), pp. 1177-1191.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., and Ladson, A.R.(1991), Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes*, 5, pp. 3-30.
- Moore, I.D., Norton, T.W., and Williams, J.E.(1993), Modelling environmental heterogeneity in forested landscapes, *J. of Hydrology*, 150, pp. 717-747.
- Mosley M.P.(1979), Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand, *Water Resource Research*, 15, pp. 795-806.
- C'Loughlin, E.M.(1981), Saturation regions in catchments and their relations to soil and

- topographic properties, *J. of Hydrology*, 53, pp. 229-246.
- Pearce, A.J., Stewart, M.K., and Sklash, M.G.(1986), Storm runoff generation in humid head water catchments, I: Where does the water come from?, *Water Resource Research*, 22, pp. 1263-1272.
- Quinn, P., Beven, K.J., Chevallier, P., and Planchon, O.(1991), The prediction of hillslope flow patterns for distributed hydrological modelling using digital terrain models, *Hydrological Processes*, 5, pp. 59-67.
- Sklash M.G., Farvolden R.N., and Fritz, P.(1976), A conceptual model of watershed response to rainfall developed through the use of oxygen-18 as a natural tracer, *Can. J. Earth Sci.*, 13, pp. 271-283.
- Stewart, M.K. and McDonnell, J.J.(1991), Modelling baseflow soil water residence times from deuterium concentrations, *Water Resources Research.*, 27(10), pp. 2681-2693.
- Troch, P.A., Mancini, M., Paniconi, C., and Wood, E.F.(1993), Evaluation of a distributed catchment scale water balance model, *Water Resources Research.*, 29(6), pp. 1805-1817.
- Wolock, D.M.(1993), Simulating the variable-source-area concept of streamflow generation with the watershed model TOPMODEL, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 93-4124, Lawrence, Kansas, p. 33.
- Zhang, W. and Montgomery, D.R.(1994), Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations, *Water Resources Research.*, 30(4), pp. 1019-1028,