

산지 소하천 유역의 물순환 해석

Hydrological cycle analysis of the small mountainous catchment

김동필 *, 황석환 **, 정성원 ***

Dong Phil Kim, Seok Hwan Hwang, Sung Won Jung

요 지

산지 소하천인 설마천 시험유역의 물순환 해석을 위한 기초자료로 강우량, 유출량, 지하수이용량, 지하수 위 변화에 의한 유역 저류량 등의 관측자료를 이용하여 연간 물수지 분석을 수행하였다. 설마천 시험유역의 유역의 물순환 구조는 자연계의 유입과 유출이 지배적이며, 이들의 수문성분을 규명하기 위해서는 각각의 수문성분들의 관측 및 해석이 필요하며, 각 수문성분들의 물수지 분석을 통하여 정량적인 합의를 결과를 가지적으로 확보함이 매우 중요하다. 신뢰도와 정확성에 근거한 관측자료를 이용한 물순환 해석결과는 수문성분들의 총체적 표현이라 할 수 있는 모형(model)의 중요 입력자료이며, 모형의 분석결과를 검증할 수 있는 중요한 기준이 된다. 설마천 시험유역에 기 설치된 수문모니터링 자료로 물순환 해석을 수행하는 데는 부족함이 있다. 따라서, 추가적인 수문관측 및 모니터링이 필요하며, 지속적인 수문모니터링이 이루어진다면 보다 구체적인 물순환 관계를 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 설마천 시험유역, 물순환 해석, 관측자료, 물수지 분석, 수문모니터링

1. 서 론

산지 소하천 유역을 대상으로 물순환 과정을 규명하기란 대단히 어려운 실정이다. 1차적으로는 수문자료의 부재가 제일 크며, 자료가 있다 하더라도 홍수기 중심 및 단기간 자료의 축적에 불과하다. 이중 설마천 시험유역은 한국건설기술연구원의 9년간 운영경험을 바탕으로 비교적 장기간의 수문자료를 축적하고 있다. 최근 4년간은 신뢰할 만한 양질의 수문자료를 구축하였으며, 현재는 신뢰도의 완성을 높이는 연구가 활발히 진행 중에 있다.

따라서, 본 논문에서는 신뢰성 있는 수문자료를 이용하여 물순환 해석을 하고자 하며, 물순환 해석에는 여러 방법이 있으나, 그 기초가 되는 관측자료를 이용하여 물순환 해석을 하였다. 관측자료를 이용한 물순환 해석의 결과는 물순환 해석 모형의 중요한 입력자료로 활용될 것이며 모형의 결과와의 비교 검토를 통해 산지 소하천 유역의 물순환 관계를 규명하는 기회를 갖게 될 것이다.

현재, 설마천 시험유역의 신뢰할 만한 관측자료에는 강우량, 유출량, 지하수이용량이며, 증발산량 산정을 위한 기상관측 및 대형증발계를 통한 실제 증발량 관측은 이루어지나 관측기기의 고장과 운영의 어려움 등으로 신뢰할 만한 관측이 이루어지지 못하는 점과 유역을 대표하는 증발산량의 관측이 연속적으로 이루어지지 못하는 실정이다(21세기 프런티어개발연구사업). 그리고 지하수위의 변화양상을 파악하기 위한 지하수 관측정의 설치도 이루어지지 않아 정확한 물순환 해석을 할 수 있는 몇 가지의 수문요소들이 부족한 상황에 놓여있다. 가용한 장·단기간의 관측자료와 물수지 분석 연산식의 추정치를 바탕으로 관측자료에 의한 물순환 해석을 하였으며, 이로써 관측자료를 이용하여 산지 소하천 유역인 설마천 시험유역의 각 수문요소의 물이동간의 정량적인 값을 알 수가 있었으며, 앞으로 추가적인 수문모니터링이 운영되고 물순환 해석 모형에

* 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · Email : dpkim@kict.re.kr

** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · Email : sukany@kict.re.kr

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 · Email : swjung@kict.re.kr

의한 검증이 수행된다면 정확한 정량적인 물순환 관계를 규명할 수 있을 뿐만 아니라 이의 관련 수문요소기술통을 확보할 수 있을 것이다.

2. 물순환 해석

2.1 대상유역

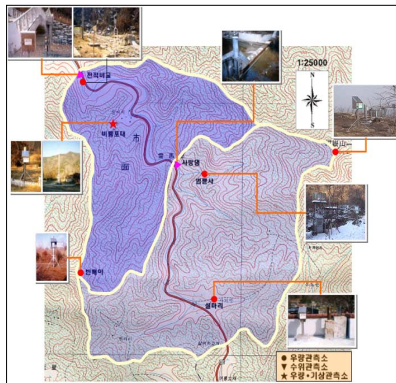


그림 1. 유역도 및 관측소 현황

설마천은 임진강 하구에서 약 46km 상류에 위치한 임진강 제 1지류인 지방 2급 하천으로 설마천 시험유역은 영국군 전적비교를 출구로 하는 유역면적 8.50km², 유로연장 5.80km, 유로경사 2.3%인 전형적인 산지 소하천 유역이다. 유역의 대부분은 산악지형으로 이루어져 있으며, 유역의 동쪽엔 시험유역에서 가장 높은 감악산(EL.675m)이 위치하고 있다. 하천의 형태는 수지상에 직각상이 결합된 형태를 보인다. 유역내의 인문사회 현황으로 유역의 총인구는 449명으로 유역의 상류에는 마을을 중심으로 일부 논과 밭을 경작하고 가축을 사육하고 있으며, 하천을 따라 휴게소와 유역의 상류와 하류에는 3개 군부대가 위치해 있다. 그리고, 본 시험유역에 설치된 관측기기로는 우량관측소 6개소, 수위관측소 2개소, 기상관측소 1개소로 관측단위는 10분으로 운영되며, 우량관측소의 밀도는 1.42km²/개소이다.

2.2 관측자료 분석

산지 소하천 유역의 물순환 해석을 위한 자료로 유역 유입량 자료에는 강우(P_{pre}) 및 지하수 이용량(Q_{gws})이며, 유역 유출량 자료에는 하천유출량(Q_{stream}), 증발산량(E_{evt}) 및 지하수위 변화에 의한 유역 저류량(ΔS)으로, 다음과 같이 식 (1)을 이용하여 물수지를 계산하였으며, 관측자료의 분석은 2003년에 발생한 유역의 유입 및 유출량을 중심으로 수집된 자료의 정리를 통하여 다음과 같이 분석을 수행하였다.

$$P_{pre} + Q_{gws} = Q_{stream} + E_{evt} + \Delta S \quad \text{식 (1)}$$

(1) 강우량 분석

먼저 유역의 유입량자료인 강우 분석에는 6개 우량관측소에서 관측된 자료를 이용하여 연간 강우량을 산정하였다. 유역평균우량의 산정은 티센가중법을 적용하였으며, 2003년에 발생한 호우사상은 표 1에서 보는 바와 같이 92개로 10mm미만의 호우사상은 총 호우사상의 64.1%를 보였다. 그리고 지속시간별 최대강우량은 2003년 8월 6일의 호우사상에서 발생하였으며, 10분, 1시간 및 24시간 최대강우량은 각각 15.0mm, 56.0mm, 190.5mm 이었다. 또한 설마천 시험유역내의 6개 우량관측소간의 강우량을 비교한 결과 지점간의 강우량의 차이는 크게 나타나지 않았으며, 각 지점의 관측우량간의 결정계수는 대부분 0.99에 근사한 값을 보였다. 그리고 각 관측소의 해발고도는 55m~675m 정도로 비교적 큰 차이를 보이나, 고도에 따른 강우량의 분포가 뚜렷이 나타날 정도로 크게 영향을 미치고 있지 않은 것으로 판단된다. 2003년 호우사상의 시·공간적 분포 특성을 파악하기 위하여 주요 호우사상에 대하여 6개 지점의 10분 누가우량곡선과 전적비교의 유역평균우량을 함께 도시하여 비교하였다. 그림 2는 2003년 7월 21일~23일에 발생한 호우사상을 나타낸 것으로 각 지점간의 강우의 시간분포는 큰 차이를 보이지 않고 있으며, 이때 발생한 호우는 크게 4개 정도의 호우로 이루어진 복합호우의 성격을 띠고 있으며 대부분의 강우량이 전반부에 위치하고 있다. 호우의 중심은 범륜사에 분포하고 있음을 알 수 있으며, 전체적으로 유역의 남서쪽에서 시작하여 북동쪽으로 이동하는 양상을 보여주고 있다. 이와 같이 강우 분석을 통하여 산정된 2003년의 유역평균우량은 1,924.7mm이다.

표 1. 호우사상의 강우량 크기 분류(2003년)

강우량(mm)	~0.5	0.5 ~5.0	5.0 ~10.0	10.0 ~30.0	30.0 ~50.0	50.0 ~100.0	100.0~	계
사상수	24	22	13	15	7	6	5	92
백분율(%)	26.1%	23.9%	14.1%	16.3%	7.6%	6.5%	5.4%	100.0
누가백분율(%)	26.1%	50.0%	64.1%	80.4%	88.0%	94.6%	100.0%	100.0

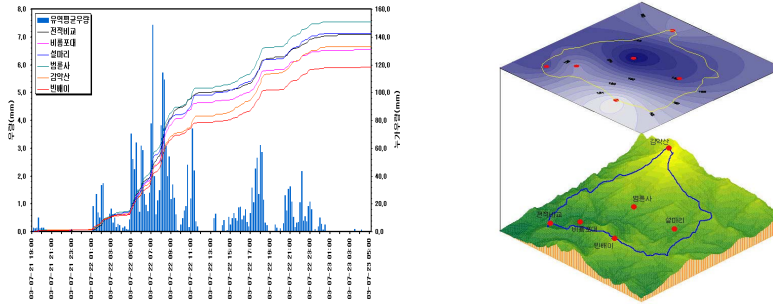


그림 2. 강우의 시공간 분포(2003년 7월 21일~23일)

(2) 지하수 이용량 분석

유역내의 지하수 이용량은 현지조사를 실시하여 자료를 수집하고 정리 분석하였다. 먼저 지하수 이용량이 상대적으로 많은 3개 군부대를 중심으로 조사를 하였다. 군부대의 생활용수는 대부분 지하수를 펌핑하여 사용하고 있었으며, 3개 군부대의 일일 지하수 이용량은 모두 103m³/day로 조사되었다. 다음은 유역내에 상주하는 설마리 주민의 지하수 이용량은 파주시 관내에 공급되는 상수도량, 즉 1인 1일 상수사용량 367ℓ를 적용하였으나, 설마리 마을에는 지표수와 지하수를 공동으로 사용하고 있으므로 1인 1일 상수사용량의 50%를 취하였고, 지하수 사용량에 대한 요금납부가 없는 것과 기타 잡용수로 사용할 것을 추정하여 가중치를 120%로 적용하여 지하수 이용량을 산정하였다. 그리고 하천 주변에 위치한 휴게소에서는 개별적으로 지하수를 생활용수로 이용하고 있다. 또한 휴게소는 여름철에 피서객이 방문하여 쉽터로 이용되고 있는 곳으로 1개 휴게소의 방문객을 조사하여 전체적으로 확대하여 지하수 사용량을 추정하였다. 이로써 설마리 주민과 피서객의 물이용량은 433.2m³/day로 산정되었다. 설마친 유역내의 지하수 총 이용량은 536.2m³/day이다.

(3) 하천유출량 분석

다음은 유역의 유출량자료인 하천유출량을 분석하였다. 하천 유출량 자료의 근간이 되는 수위관측은 유역출구인 전적비교 수위관측소에서 3종의 관측기기에서 관측된 자료는 검토와 수정의 처리 과정을 거쳐 기종별 원시자료를 확정하였으며, 기종별로 검토, 수정된 최종자료는 가장 안정적인 자료를 기본으로 하여 상호 비교 검토를 통해 지점별 대표 수위자료를 확정하였다. 다음으로 유량측정은 전적비교 수위관측소 지점에서 연간 36회를 실시하였으며, 최고와 최저수위에 근접하는 유량측정성과를 확보하였다. 설마친 시험유역에서 준용한 유량측정방법은 국제표준기구(ISO)와 미국지질조사국(USGS)에서 제시한 방법을 적용하였다. 그림 3과 4는 평수기 및 홍수기시 유량을 측정하는 모습이다. 그리고 유량측정성과에 대한 측정오차크기를 통계적 추정치로 표현하는 불확실도를 산정하여 유량측정에 대한 신뢰도를 개선시켰다. 유량측정성과를 바탕으로 작성된 수위-유량관계곡선은 수위-유량관계의 구간 및 기간분리를 고려하여 작성하였으며, 구간분리는 흐름이 0인 수위(Gauge Height of Zero Flow: GZF)를 초기치로 기간분리는 호우기간을 전후하여 수위-유량관계곡선식을 유도하였다. 확정된 수위자료와 구간 및 기간분리가 고려된 수위-유량관계곡선식을 이용하여 유출량 자료로 환산하였다. 환산된 유출량은 전적비교의 상류에 위한 사방댐 지점과 월별 및 주요 호우사상에 대한 유출률을 비교 검토하여 하천유출량 자료를 확정하였다. 그림 5는 설마친 유역의 강우-유출현황을 나타내는 것으로 전적비교의 2003년의 년유출률은 74%를 보였다.



그림 3. 평상시 유량측정



그림 4. 홍수기 유량측정

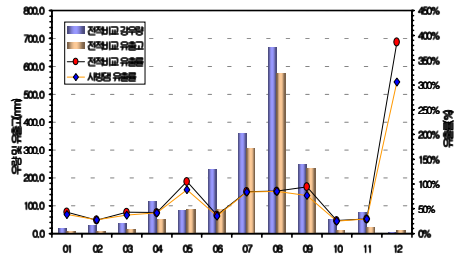


그림 5. 강우-유출 현황

(4) 증발산량 분석

증발산량 자료의 분석은 신뢰할 만한 자료의 부족과 비연속 관측(21세기 프런티어개발연구사업)으로 어려움이 따랐다. 따라서 다음과 같은 가정을 통하여 유역 증발산량을 산정하였다. 설마천 시험유역은 산림이 대부분을 차지하고 있어 증발산이 활발히 이루어진다고 보았으며, 갈수시의 하천 유출량 측정시 6mm미만의 일강우량은 하천 유출량에 기여하지 못하고 있음을 보았을 때 연간 발생한 강우량 중 일강우량 6mm미만의 합을 총 증발산량으로 추정하여 분석하였으며 산정된 증발산량은 433.2mm/yr이다.

(5) 지하수위 변화에 의한 저류량 분석

설마천 시험유역에는 지하수위 변화 거동을 파악하기 위한 관측정이 없는 관계로 지하수위 변화에 의한 저류량 분석은 불가능한 실정이다. 따라서 식(1)의 물수지 분석 연산식에서 저류량을 미지의 값으로 하는 이항정리를 통하여 분석을 하였다.

2.3 해석결과

이상과 같이 각 요소별 분석을 통하여 종합한 결과는 표 2와 같다. 표 2에서 보는 바와 같이 각 물순환 구성 요소별 연간 유출고(mm)를 산정한 결과는 지하수위 변화에 의한 저류량의 값을 제외한다면 매우 양호한 정량적인 값을 도출하였다고 할 수 있다. 정확한 물순환 과정을 파악하기 위해서는 모든 요소의 정밀관측 및 분석이 필요하다. 설마천 시험유역과 같은 산지 소하천 유역에서의 큰 비중을 차지하고 있는 요소는 강우량 및 하천 유출량이다. 따라서 정밀관측을 위한 투자와 노력이 지속적으로 필요하다. 앞으로 물순환 구성요소들의 정밀관측과 조사를 통하여 각 요소의 불확실성을 개선시켜 나간다면 유역의 물순환 과정을 보다 더 정밀하게 해석할 수 있을 것이다.

표 2. 설마천 시험유역 연간 물수지 분석결과(2003년)

요 소	유출고(mm/yr)	비 고
유입량 총계(a)	1,947.7	
강우량(b)	1,924.7	· 설마천 시험유역 강우분석자료
지하수이용량(c)	23.0	· 현지조사 분석자료
유출량 총계(d)	1,947.7	
하천유출량(e)	1,419.1	· 수위관측 및 유량측정결과(전적비교 수위관측소)
증발산량(f)	433.2	· 일강우량 6mm미만 적용
유역저류량(g)	95.4	· 이항정리에 의한 추정치, (a)-[(e)+(f)]

3. 결론

산지 소하천 유역은 대부분 자연과 일부 인공적인 요소의 이중적 구조를 가지고 끊임없이 물순환을 반복한다. 관측자료를 이용하여 산지 소하천 유역인 설마천 시험유역에 대해 물순환 관계를 해석하였으나, 일부 관련 자료의 미흡으로 제한된 분석결과만을 얻는데 만족하였다. 각 물순환 각 요소별 지속적인 수문 모니터링이 체

계적으로 이루어지고, 물순환 해석 모형에 의한 검증이 수행된다면 설마천 시험유역의 물순환 과정을 보다 더 정밀하게 해석할 수 있을 것으로 여기며, 이와 관련된 수문요소기술을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

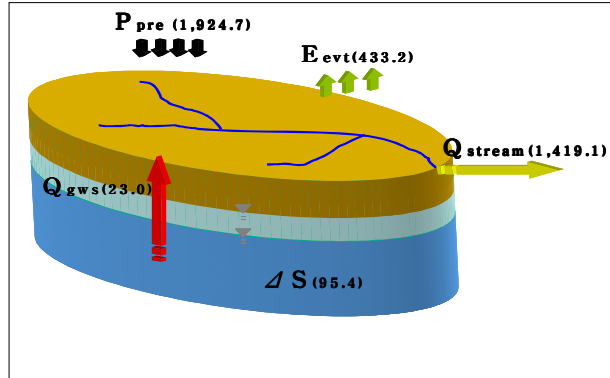


그림 6. 설마천 시험유역 연간 물수지도(2003년)

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프린터어개발연구사업인 수자원의지속적확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 2-1-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원, 시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구, 건기연 2003-051
2. Techniques of Water Resources Investigations of the USGS(1984), ch. A7, A8, A10
3. ISO, Measurement of Liquid Flow in Open Channels -Velocity-Area Methods(1997), ISO-748:1997(E)