

산지하천 유역의 수문조사와 분석

Hydrological Survey and Analysis of the Mountainous River Basin

김동필*

Dong Phil Kim

요 지

우리나라는 전 국토의 70%가 산지이고 하천경사가 다른 나라에 비해 상대적으로 급하여 홍수 관리에 매우 불리한 조건을 가지고 있으며, 특히 홍수기간의 집중호우 및 돌발홍수는 인명과 재산의 막대한 피해를 입히고 있다. 최근은 기후변화의 영향으로 집중호우 및 돌발홍수는 증가하는 추세에 있다. 이것은 홍수의 위험성 및 자연재해의 발생을 증대시키므로 이에 대한 하천유역 단위의 홍수량 예측 및 재해방지를 위한 설계기법의 개선과 개발, 신뢰성 있는 수문정보 획득을 위한 정밀 수문조사는 매우 필요한 상황이다. 기후변화에 대응하기 위한 수문조사의 방향은 새로운 국면에 접하였다고 볼 수 있다. 기존의 수문조사 방법을 통해 획득했던 수문량의 초과치를 벗어난 극대값의 수문량 관측 및 측정을 극복하는 문제, 홍수량 산정 및 예측을 위한 새로운 설계기법의 개발 또는 기존 방법의 개선 등 문제 해결을 위한 방향이 모색되어야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 중·소규모 유역 단위를 대상으로 지속적이고 신뢰성 있는 자료의 획득과 축적이 중요하나 시·공간적으로 모두 충족된 수문자료를 획득하기에는 불가능한 일이다. 따라서, 중·소규모 유역 단위의 대표성 있는 Test-bed 유역(설마천 유역/차탄천 유역)의 운영이 요구되며, 이를 통하여 얻어진 수문자료는 상기에 기술한 문제를 해결 가능하게 한다. Test-bed 유역에서 생성되는 수문자료에는 강우량, 하천수위, 지하수위 및 기상 등의 관측자료와 유량측정성과 자료가 있다. 관측된 수문자료를 이용하여 강우-유출량 분석, 증발산량 분석, 지하수함양량 분석 등 기본적인 수문특성을 분석하였다. 홍수량 예측 설계기법 개선으로는 홍수도달시간 산정방법을 검토하였으며, 최대강우강도-도달시간관계를 이용하여 도달시간을 개발하였다. 그리고 RDAPS 예측강우량과 수문모형을 이용하여 홍수량을 예측할 수 있는 시스템을 구축하였다. 유역 단위의 수문조사를 통해 생성된 수문자료는 다양한 분석과 설계에 응용되므로 지속적인 Test-bed 유역의 운영은 매우 필요한 실정이다.

핵심용어 : 수문조사, Test-bed 유역, 수문자료

1. 서 론

우리나라는 전 국토의 70%가 산지이고 하천경사가 다른 나라에 비해 상대적으로 급하여 홍수 관리에 매우 불리한 조건을 가지고 있으며, 특히 홍수기간의 집중호우 및 돌발홍수는 인명과 재산의 막대한 피해를 입히고 있다. 최근은 기후변화의 영향으로 집중호우 및 돌발홍수는 증가하는 추세에 있다. 이것은 홍수의 위험성 및 자연재해의 발생을 증대시키므로 이에 대한 하천유역 단위의 홍수량 예측 및 재해방지를 위한 설계기법의 개선과 개발, 신뢰성 있는 수문정보 획득을 위한 정밀 수문조사는 매우 필요한 상황이다. 기후변화에 대응하기 위한 수문조사의 방향은 새로운 국면에 접하였다고 볼 수 있다. 기존의 수문조사 방법을 통해 획득했던 수문량의 초과치를 벗어난 극대값의 수문량 관측 및 측정을 극복하는 문제, 홍수량 산정 및 예측을 위한 새로운 설계기법의 개발 또는 기존 방법의 개선 등 문제해결을 위한 방향이 모색되어야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 중·소규모 유역 단위를 대상으로 지속적이고 신뢰성 있는 자료의 획득과 축적이 중요하나 시·공간적으로 모두 충족된 수문자료를 획득하기에는 불가능한 일이다. 따라서 중·소규모 유역 단위의 대표성 있는 Test-bed 유역(설마천 유역/차탄천 유역)의 운영이 요구되며, 이를 통하여 얻어진 수문자

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 · 하천연구소 수석연구원 · E-mail : dpkim@kict.re.kr

료는 상기에 기술한 문제를 해결 가능하게 한다. 본 논문에서는 한국건설기술연구원에서 운영하는 Test-bed 유역을 대상으로 신뢰성 있는 2015년 관측자료를 이용하여 수문특성을 분석하였다.

2. 유역 개요

Test-bed 유역인 설마천 유역(경기도 과주시 적성면 소재)은 설마천 중류부에 위치한 전적비교를 출구로 하는 상류 유역이다. 설마천 유역은 유역면적 8.48km², 유로연장 5.59km인 전형적인 산지 하천이다. 수계형상은 대체로 수지상의 모양을 보여주고 있으며 유역형상은 수엽상에 흡사하다. 유역의 대부분은 산악지형으로 이루어져 있으며, 유역의 동쪽엔 유역에서 가장 높은 감악산(EL. 675m)이 위치하고 있다. 도로를 따라 위치하는 주 하천은 그림 1의 유역도에서 보는 바와 같이 전형적인 곡류하천의 형태를 보이고 있다. 차탄천 유역(경기도 연천군 소재)은 경기북부 지역인 연천군과 철원군을 포함하며, 유역면적은 190.64km², 유로연장 38.49km, 유역평균폭 4.95km, 유역평균경사는 31.84% 이다(그림 2). 유역의 평균고도는 EL.227m로 동부와 북부지역은 고지대이고, 남부와 서부는 비교적 평탄한 지형을 이루고 있으나, 대부분 경사가 급한 산악지형으로 이루어져 있다. 차탄천은 남남서방향으로 사행하여 흘러 한탄강에 합류하고 하구로부터 차탄교 구간은 U자형 곡을 이루고 있으며, 상류지역은 모래, 자갈, 호박돌이 불규칙하게 분포하고 있다.

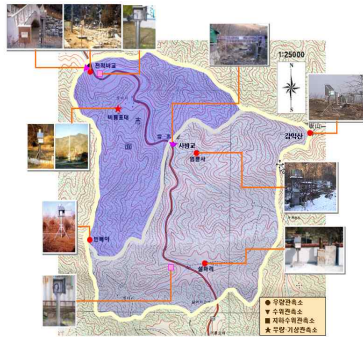


그림 1. 설마천 유역도

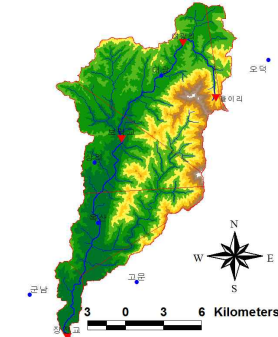


그림 2. 차탄천 유역도

3. 관측자료를 이용한 수문특성 분석

유역의 수문특성 분석을 위한 유입량 자료에는 강우량(P_{pre}) 있으며, 유출량 자료에는 하천유출량(Q_{stream}), 증발산량(E_{evt}) 및 지하수위 변화에 의한 지하수 함양량(ΔS)이 있고, 그 밖에는 지하수 이용량(Q_{gws})이 있다. 2015년에 생성된 유역의 유입량, 유출량 자료를 중심으로 식 (1)과 같이 수문특성을 분석하였다.

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

3.1 강우량 분석

먼저 유역의 유입량 자료인 강우량 분석을 위하여 설마천 유역과 차탄천 유역의 각각 6개 강우량관측소에서 관측된 자료를 이용하여 연 강우량을 산정하였다. 유역평균강우량의 산정은 티센가중법을 적용하였으며, 2015년에 발생한 호우사상은 표 1에서 보는 바와 같이 각각 67개, 개로 50mm 이상의 호우사상은 각각 2개, 3개로 나타났다. 그리고 설마천 유역의 지속기간별 10분, 1시간 및 24시간 최대강우량은 12.8mm, 42.5mm, 94.9mm 이다(그림 3). 2015년 호우사상의 시간적 분포 특성을 파악하기 위하여 주요 호우사상에 대하여 각 지점의 10분 누가우량곡선과 유역 출구의 유역평균강우량을 함께 도시하여 비교하였다(차탄천 유역, 그림 4). 이와 같이 강우량 분석을 통하여 산정된 2015년의 유역평균강우량은 835.8mm(설마천 유역), 969.6mm(차탄천 유역)이다.

역)이다.

표 1. 호우사상의 강우량 크기 분류(2015년)

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
호우사상수	설마천	10	24	12	14	5	1	1	67
	차탄천	11	29	11	13	4	2	1	72

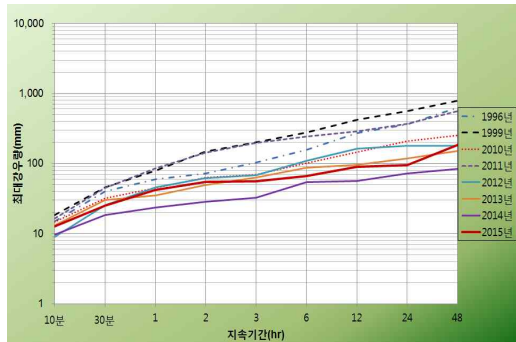


그림 3. 지속기간별 최대강우량(설마천)

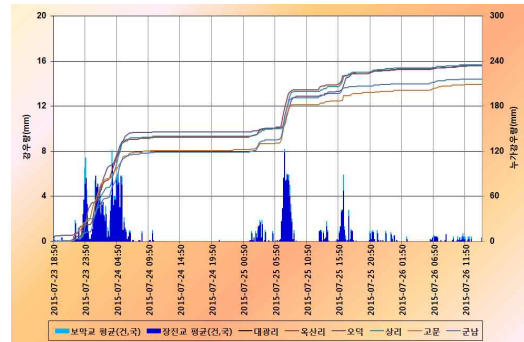


그림 4. 10분 누가강우량 곡선(차탄천)

3.2 하천유출량 분석

하천유출량 자료의 근간이 되는 수위관측은 유역출구인 전적비교 수위관측소(설마천 유역)와 장진교 수위관측소(차탄천 유역)의 관측기에서 관측된 자료의 검토와 수정의 처리 과정을 거쳐 기종별로 자료를 확정하였다. 설마천 유역의 경우에는 기종별 자료를 상호 비교 검토하여 지점 대표 수위자료를 확정하였다. 유량측정은 각 유역출구 인근에서 하였으며, 유량측정방법은 국제표준기구(ISO)와 미국지질조사국(USGS)에서 제시한 방법을 적용하였다. 유량측정성과를 바탕으로 작성된 수위-유량관계곡선은 구간 및 시간분리를 고려하여 작성하였으며, 구간분리는 흐름이 '0'인 수위(GZF)와 단면형상을 기본으로 분리하였다.

확정된 하천수위자료와 수위-유량관계곡선식을 이용하여 유출량 자료로 환산하였다. 설마천 유역의 경우 유출률은 총강우량 대비 36.2%, 차탄천 유역은 38.2%를 보였다.

표 2. 연 유출률(2015년)

구분	설마천 유역(전적비교)			차탄천 유역(장진교)		
	총강우량(mm)	총유출고(mm)	유출률(%)	총강우량(mm)	총유출고(mm)	유출률(%)
계	835.8	302.3	36.2	969.6	370.5	38.2

3.3 증발산량 분석

증발산량 분석은 다음의 가정을 통하여 유역 증발산량을 산정하였다. 설마천 유역은 대부분 산림이 차지하고 있으므로 증발산이 활발히 이루어진다고 보았으며, 6.0mm 미만의 일강우량은 하천 유출량에 기여하지 못하고 있으므로 판단하여 연간 발생한 강우량 중 일강우량 6.0mm 미만의 합인 321.3mm(차탄천 유역의 경우 330.4mm)를 증발산량으로 추정하였다.

또한, 유역내 설마리 기상관측자료와 인근의 기상청 관할 동두천, 파주 기상관측소의 자료(설마리 기상관측자료 부분 결측 시 보완자료로 활용)를 이용하여 FAO Penman-Monteith Equation을 적용하여 잠재증발산

량(E_{tr})을 산정한 후, 작물계수(crop coefficient, k_c)와 토양계수(soil coefficient, k_s)를 곱하여 실제증발산량($E_t = k_s k_c E_{tr}$)을 산정한 결과는 496.2mm 이다(차탄천 유역의 경우 484.2mm 임). 본 논문의 수문특성 분석에 적용한 증발산량은 후자의 경우로 하였다. 여기서 산정된 잠재증발산량은 838.9mm(총 강우량의 100.4%)이다(차탄천 유역의 경우 931.4mm(총 강우량의 96.0%)). 1~3월, 11~12월은 작물의 생장이 없으므로 작물계수 적용 기간에서 최저값인 0.2를 적용하였다. 작물중에 따른 세부적인 작물계수 산정, 유역에 적합한 단일 토양계수 추정에 따른 불확실성을 내포하므로 전체적인 물수지 평형을 고려하여 작물계수 및 토양계수를 추정하였다.

표 3. FAO Penman-Monteith Equation을 이용한 증발산량 산정(2015년)

구분	설마천 유역		차탄천 유역	
	유출고(mm)	비율(%)	유출고(mm)	비율(%)
강우량	835.8	-	969.6	-
잠재증발산량(E_{tr})	838.9	100.4	931.4	96.0
실제증발산량(E_t)	496.2	59.4	484.2	49.9

3.4 지하수 함양량 분석

설마천 유역의 지하수 함양량 분석은 설마리 지하수위관측소에서 관측된 자료를 이용하여 지하수위 변동곡선 해석법으로 지하수 함양량을 산정하였다. 지하수계는 지하수의 함양과 배출에 의해 장기적으로 동적 평형상태를 유지하는 가정조건을 지닌 지하수위 변동곡선 해석법은 강수 시 발생하는 지하수위변화에 대해 비산출률을 곱하여 지하수 함양량(R)을 산출하는 방법으로 식 (2)와 같다.

$$R = S_y \cdot \Delta h + \Delta Q \quad (2)$$

설마천 유역의 지질은 경기편마암 복합체로 구성되어 있으며, 편마암은 근본적으로 화강암에서 기원한 것이므로 비산출률값은 화강암(0.09%)의 경우로 적용하였다. 그 결과 지하수 함양량은 37.3mm로 분석되었다. 여기서, S_y 는 자유면 대수층의 비산출률, Δh 는 지하수위 변동량, ΔQ 는 함양기간 동안 대수층으로부터 배출된 지하수량으로 나타낼 수 있으며, ΔQ 는 실제 관측할 수는 없지만 지하수 함양이 짧은 시간 동안 발생한다고 가정할 때 무시될 수 있다. 차탄천 유역의 경우는 지하수위관측소가 없으므로 본 논문에서 분석은 제외하였다.

3.5 분석 결과

각 요소별 수문특성을 분석한 결과는 표 4와 같다. 증발산량과 지하수 함양량은 추정된 매개변수를 이용하여 산정된 결과로 나타나지만 전반적으로 볼 때, 매우 양호한 정량적인 값을 도출하였다고 볼 수 있다. 그리고 지하수 이용량은 현지조사를 통하여 정리한 값이다.

표 4. 수문특성 분석 결과(2015년)

요소	설마천 유역		차탄천 유역		비고	
	유출고(mm)	비율(%)	유출고(mm)	비율(%)		
유입량	강우량	835.8	-	969.6	-	· 강우량 분석자료
	하천유출량	302.3	36.2	370.5	38.2	· 수위관측 및 유량측정결과
유출량	증발산량	496.2	59.4	484.2	49.9	· FAO Penman-Monteith Equation 적용
	지하수 함양량	37.3	4.5	115.2	11.9	· 지하수위 변동곡선 해석법 적용/추정
기타	지하수 이용량	23.0	-	-	-	· 현지조사 분석자료

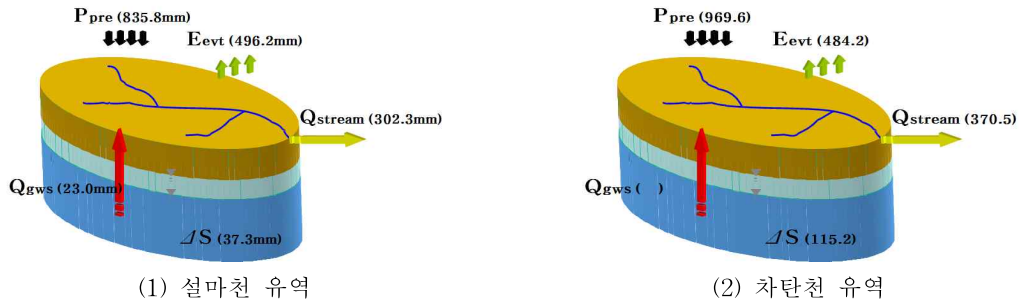


그림 3. 수문특성 분석 결과(2015년)

4. 도달시간 분석

도달시간 산정은 AMC(선형토양함수) 조건 중 AMC (III) 조건의 호우사상을 중심으로 최대강우강도-도달시간관계 이용하여 강우강도별 도달시간을 산정하였으며, 기 개발된 공식과 비교 검토하였다. 설마천 유역의 경우 최대강우강도 108.0mm/hr 시 유속은 4.5m/s가 되며, 이때의 도달시간은 20.7분으로 산정된다. 그리고 연속형 Kraven 공식의 최대유속 4.5m/s 적용 시에도 도달시간은 20.7분으로 산정된다. 차탄천 유역의 경우 최대강우강도 117.6mm/hr 시 유속은 4.5m/s가 되며, 이때의 도달시간은 145.6분으로 산정된다. 그리고 연속형 Kraven 공식의 최대유속 4.5m/s 적용 시에도 도달시간은 145.6분으로 산정되므로 유역최대강우강도를 도달시간 산정을 위한 매개변수로 사용함은 매우 유용하다고 할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 Test-bed 유역의 2015년 관측자료를 이용하여 수문특성을 분석하였다. 강우량이 상대적으로 적었던 2014년 수문자료와 비교한 결과 합리적인 유출량을 산정할 수 있었다. 기본이 되는 강우량자료에서 하천수위 및 지하수위자료, 기상자료 등을 이용하여 각 요소별 정량적인 값을 도출하였다.

유역의 정확한 수문특성을 분석하기 위해서는 정밀관측을 위한 투자와 노력이 지속적으로 필요하며, 앞으로 수문특성 요소의 정밀관측과 조사를 통하여 각 요소의 불확실성을 개선시켜 나간다면 유역의 물의 순환 과정을 보다 더 정밀하게 해석할 수 있을 것이다. 또한 유역 단위의 수문조사를 통해 생성된 수문자료는 다양한 분석과 설계에 응용되므로 지속적인 Test-bed 유역의 운영은 매우 필요한 실정이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 산지하천 유역의 홍수예측을 위한 수문조사의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 설마천-차탄천 수문정보시스템(<http://seolmacheon.kict.re.kr>).
2. 한국건설기술연구원 (2015), 산지하천 유역의 홍수예측을 위한 수문조사, 건기연 2015-090.
3. ISO-748:1997(E) (1997), Measurement of Liquid Flow in Open Channels-Velocity-Area Methods.
4. Techniques of Water Resources Investigations of the USGS (1984). ch. A7, A8, A10.