

## 설마천 시험유역 운영



김 동 필 >

한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원  
dpkim@kict.re.kr

### 1. 서론

수문학 연구에서 가장 어려움을 겪고 있는 것은 정도 높은 수문자료의 부재에 있다. 일반적으로 수문자료는 강우량, 유출량 등을 말하며 자료의 신뢰도와 정확성을 기본으로 한다. 신뢰성 있는 수문자료는 전문인력에 의해 관측기기가 유지 관리되고 현장 관측이 실시되어야 획득할 수 있다. 그러나 실질적 투자도 미흡한 반면, 투자에 비해 얻는 성과도 항상 기대치 이하인 경우가 많기 때문에 투자의 필요성을 인지하면서도 낮은 투자효율 때문에 좋은 성과를 얻지 못하고 있는 실정이나, 최근에는 수문자료의 중요성이 부각되고 있으며, 정부차원에서 투자 확대 및 전문인력의 양성을 통한 고품질의 자료생성에 노력을 기울이고 있다.

외국의 경우 소규모 시험유역을 상당수 운영하고 있는 반면에, 우리나라 시험유역의 경우에는 국제수문개발계획(IHP)의 일환으로 평창강, 보청천, 위천에 시험유역이 비교적 장기간 운영되고 있었으나 예산 축소 및 운영 노력의 부족 등으로 지속되지 못하고 유역수가 다소 축소된 새로운 유역의 운영을 시도하고 있다. 그밖에 대학 및 일부 기관에서도 목적에 맞게 일부 시험유역을 단기적으로 운영하고 있는 실정이다. 2001년부터 21세기 프런티어사업의 일환으로

용담댐, 섬강, 이동 시험유역 등이 6년간의 충실한 운영을 통하여 양질의 자료를 생성하고 있으나 사업과 지속적인 관계를 가지지 못하고 독자적인 운영체계를 통해 유지되는 상황이다. 따라서 우리나라는 시험유역의 수가 절대 부족한 것과 체계적이고 장기적으로 운영되지 못하고 있는 것이 문제라 할 수 있다.

따라서 다양한 수리·수문 연구를 위해서는 시험유역 수의 확대와 장기간의 운영으로 고품질의 다양한 수리·수문자료를 확보하는 것이 무엇보다도 필요한 상황이다. 이에 한국건설기술연구원에서는 1995년부터 설마천 시험유역을 운영하면서 산지 소하천 유역의 특성변화와 수문·기상 등 기초자료에 대한 지속적인 관측과 자료 축적을 해오고 있다. 본고에서는 그동안 축적되어온 설마천 시험유역의 신뢰성 높은 수문자료에 대한 공유와 활용성 증대를 위해 2006년의 운영 현황을 중심으로 설마천 시험유역을 소개하고자 한다.

### 2. 설마천 시험유역 개요

#### 2.1 유역 개황

설마천은 임진강 하구에서 약 46km 상류인 경기도 파주시 적성면 두지리 지점에서 좌안측으로 유입하는 임진강의 제1지류인 지방2급 하천이며, 유역면적 18.56km<sup>2</sup>, 유로연장 10.77km로서 임진강 전체 유역면적(A=8,117.5km<sup>2</sup>, L=254.6km)의 약 0.2%를 점하고 있고 수계형상은 대체로 수지상의 모양을 보여주고 있으며 유역형상은 수협상에 흡사하다. 이중에서 시험유역은 설마천 유역의 중류부에 위치한 영국군 전

적비교를 출구로 하는 상류 유역이다. 설마천 시험 유역은 유역면적 8.48km<sup>2</sup>, 유로연장 5.59km인 전형적인 산지 하천이다. 유역내의 인문사회 현황으로는 유역의 상류에는 21가구(69명)가 분포하고, 마을을 중심으로 일부 논과 밭을 경작하고 가축을 사육하고 있으며, 하천을 따라 휴게소(24가구, 81명)와 유역의 중류부에 범문사가 위치하고 있고, 유역의 상류와 하류부에는 3개 군부대(287명)가 위치하고 있다(2004년 기준). 전반적으로 개발이 많이 이루어지지 않은 유역으로, 앞으로도 자연 상태의 산지 하천의 특성을 유지할 것으로 판단된다. 이 유역의 대부분은 산악지형으로 이루어져 있으며, 유역의 동쪽엔 시험유역에서 가장 높은 감악산(EL. 675m)이 위치하고 있다. 도로를 따라 위치하는 주 하천은 그림 1

의 유역도에서 보는 바와 같이 전형적인 곡류하천의 형태를 보이고 있다.

## 2.2 지형 및 지질

설마천 시험유역의 지형특성은 표 1과 같으며, 수위 관측소를 기준으로 소유역별로 정리하였다. 전체 유역면적이 8.48km<sup>2</sup>로 작기 때문에 유역의 각종 지형인자는 대축척의 지도를 이용하는 것이 바람직하나, 설마천 시험유역은 군사지역이기 때문에 입수할 수 있는 최대 축척인 1/25,000 지형도 및 지리정보시스템을 이용하여 구하였다(사방교, 전적비교 제원은 지형도 및 지리정보시스템 이용, 설마천 하구제원은 “임진강(1지구) 하천정비기본계획, 2003. 12, 경기도” 인용).

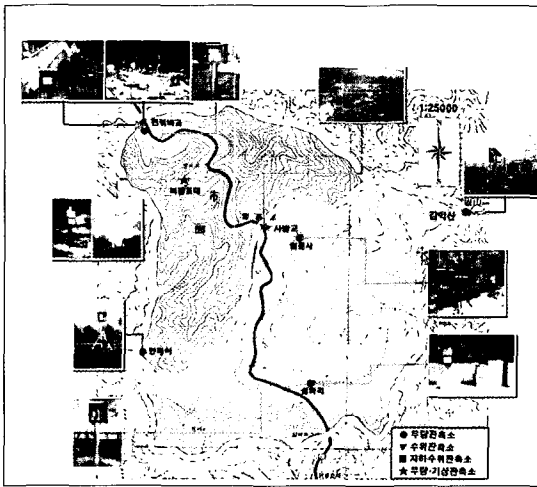


그림 1. 설마천 시험유역도

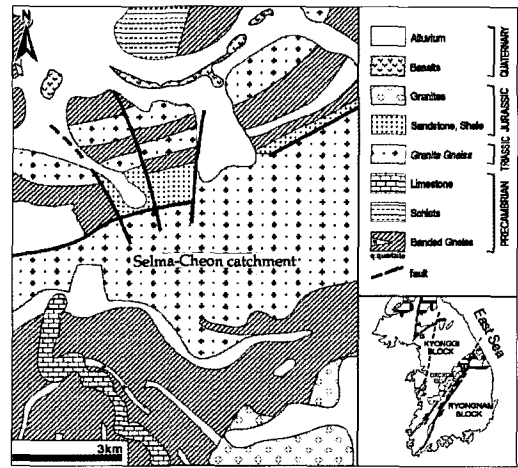


그림 2. 설마천 시험유역 지질도

표 1. 설마천 시험유역 지형인자

지형인자	유역별	사방교	전적비교	설마천 하구	비고
유역면적		5.03	8.48	18.56	A=km <sup>2</sup>
분류 유로연장		2.93	5.59	10.77	L=km
본지류 유로연장		5.29	8.31	-	L'=km
유역 평균폭		1.72	1.52	1.72	A/L=km
형상계수		0.59	0.27	0.16	A/L <sup>2</sup>
하천밀도		5.57	8.15	-	L'/A
유역 평균경사		31.84	34.01	29.66	%
유로경사		2.54	2.15	1.99	%

표 2. 유역의 평균유출곡선지수 (AMC-II 조건)

구분 소유역	토지 이용 상태	토 양 형								면적 합 (km <sup>2</sup> )	평균유출 곡선지수 (CN)
		A		B		C		D			
		면적 (km <sup>2</sup> )	CN	면적 (km <sup>2</sup> )	CN	면적 (km <sup>2</sup> )	CN	면적 (km <sup>2</sup> )	CN		
사방교	나지	0.005	77	0.023	86			0.012	94	0.04	87
	초지	0.004	30	0.008	58			0.006	78	0.018	57
	산림지역	0.285	57	1.597	73			2.926	86	4.808	80
	농업지역	0.042	67	0.108	78			0.014	89	0.164	76
	계	0.336		1.736				2.958		5.03	80
전적비교	나지	0.005	77	0.031	86			0.015	94	0.051	88
	초지	0.006	30	0.023	58			0.017	78	0.046	62
	산림지역	0.377	57	1.791	73			5.987	86	8.155	82
	농업지역	0.042	67	0.149	78			0.037	89	0.228	78
	계	0.43		1.994				6.056		8.48	82

설마천 시험유역은 선캠브리아기의 경기편마암 복합체로 구성되어 있다. 유역의 남부에는 주로 호상의 염리를 보이는 편마암이 우세하고, 북부로 가면서 안구상 편마암이 우세하게 발달하였으며, 곳에 따라 재결정된 규암과 변성 관입암류가 관찰된다. 또한, 시험유역은 작은 절리가 많이 발달되어 있고, 염리의 절리로 작용하는 등 지질구조의 특성상 초기 강우시 소량의 우량에는 하천의 수위에 큰 변화를 보이지 않으나, 파쇄대를 채우고 난 이후에는 하천의 수위가 급격히 증가하는 양상을 보일 것으로 예상된다. 그림 2는 설마천 시험유역의 지질도이다.

### 2.3 산림·토양

설마천 시험유역의 임상은 아교목 또는 관목 상태의 활엽수림과 혼효림이 대부분을 차지하고 있으며, 계곡 근처 사면의 하부에 국소적으로 일본 잎갈나무와 잣나무가 식재되어 있다. 또한, 산림의 층상 구조가 발달하지 않아 유역의 산림이 가지는 수원의 함양 능력은 대단히 낮은 것으로 평가되며, 산지 사면에 산재한 다량의 작은 돌이나 자갈이 여름철 강우나 집중호우시 지표면 유출수와 함께 이동하여 2차 하천에 유입됨으로써 토석류를 유발할 우려가 높기 때문에 2차 하천에

토사의 이송 및 토석류 등에 의한 재해를 방지하기 위한 사방댐이 설치되어 있으며, 추가적인 토석 이동 억제장치의 설치가 필요한 것으로 판단된다.

설마천 시험유역에 대한 정밀 토양도를 이용하여 산림토양의 특성에 SCS의 기준을 적용하여 유출곡선지수(Curve Number, CN)를 도출해 내었으며, 표 2와 같이 유역의 유출곡선지수를 구하였다.

### 3. 수문자료 수집 및 검토

설마천 시험유역에는 그림 1과 같이 우량관측소 6개소, 하천수위관측소 2개소, 지하수위관측소 2개소 및 기상관측소 1개소가 운영되고 있으며, 절측 최소화 및 이상치 발생의 사전 예방을 위하여 월 2회 이상의 관측기기 점검, 2중 이상의 관측기기 운영 및 실시간 모니터링 시스템 운영 등을 수행하고 있다. 일상적인 관측기기의 유지관리와 수문·기상관측 및 관측자료의 검토 등 일련의 수문관측 및 자료처리 과정을 통해 양질의 우량과 하천수위, 유량, 기상자료 등을 10분 단위(지하수위는 1시간 단위)로 연속적으로 생성하며, 수질 및 부유사량 자료는 비연속적 자료로 생성하고 있다. 이러한 수문자료는 수문관련 연구에

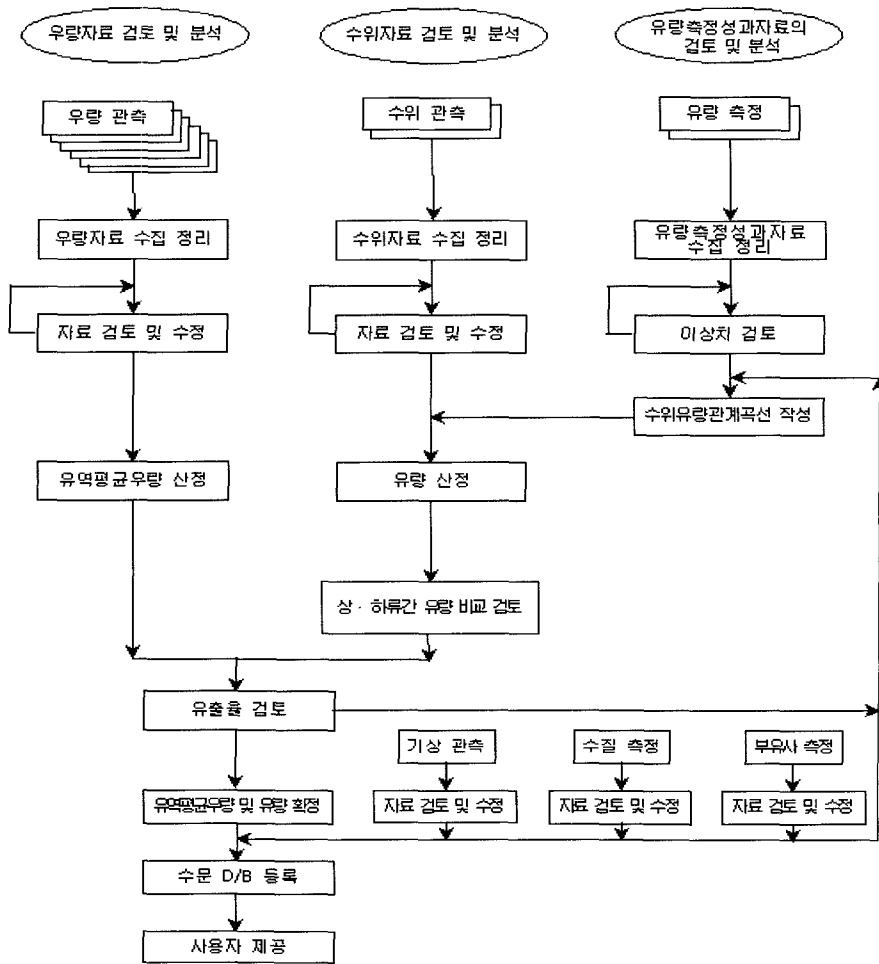


그림 3. 수문자료 처리절차

활용되도록 수문자료를 데이터베이스화하여 일반에게 제공하고 있으며, 실시간 모니터링 시스템을 근간으로 설마천 시험유역 홈페이지(<http://kict.datapcs.co.kr>) 및 휴대폰을 통하여 실시간으로 자료를 확인할 수 있도록 하고 있다.

설마천 시험유역에서 관측된 자료는 수문자료 처리절차에 따라 자료처리 과정을 거치게 되며, 우량자료는 이상치 검토, 우량계 종류 및 지점에 따른 비교, 인근 기상청 자료와의 비교 등 일련의 검토과정을 거쳐 최종적으로 지점별 대표자료를 확정한다. 수위자

료는 목자수위표 자료와의 비교, 시간축 보정, 이상치 검토, 동절기 하천결빙자료 처리, 기종간 비교, 상·하류 비교, 강우-수위관계 검토 등의 과정을 거쳐 대표자료를 확정한다.

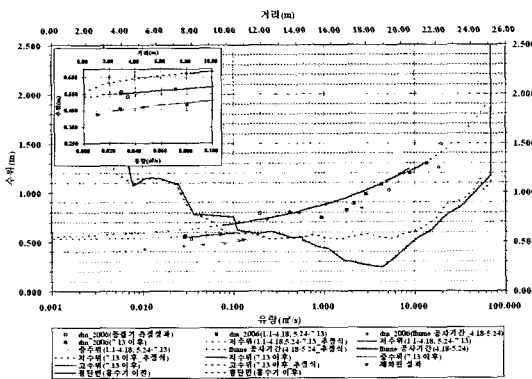
설마천은 산지 소하천 유역으로 하천경사가 크며, 하상의 세굴과 퇴적이 반복해서 발생하므로, 큰비가 오면 수위-유량관계가 변화하는 특성을 갖는다. 따라서 정밀한 유량자료를 확보하기 위해 일반적인 유량측정횟수인 연간 30회에 상회하는 유량측정을 수행하고 있으며, 평상시에는 월 2회 이상, 호우발생시

에는 현장에서 상주하면서 수위변화에 따라 유량측정을 지속적으로 수행하고 있다. 2006년의 경우 전적비교와 사방교에서 측정한 유량측정성과는 각각 32회와 31회이며 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

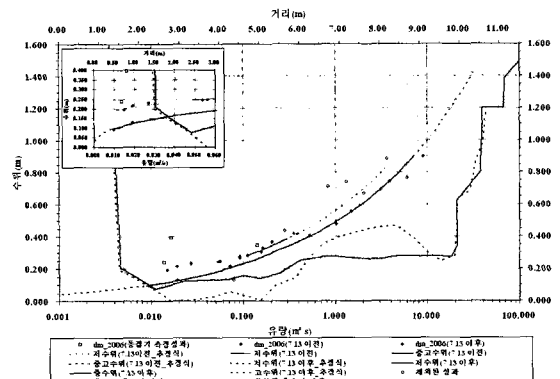
전적비교는 단 단면의 하천형태를 보이고 있으나, 홍수기 이전, Flume 공사기간 및 홍수기 이후 크게 3개 기간으로 하천단면의 변화를 보이며, 홍수기 이전과 이후의 기간 동안에도 구간분리의 양상을 보여 홍수기 이전에는 2개 구간, 홍수기 이후에는 3개 구간으로 수위-유량관계를 분리하여 작성하였다. 수위-유량관계의 구간 분리를 위해 통계특성으로 수위표 지점의 하천단면 형태를 고려하였으며, 측정된 유량측정성과의 특성도 함께 고려하였다. 그림 4(a)과 같이 횡단면의 좌안부는 홍수기 전·후 단면의 변화는 적으나, 우안부는 크게 퇴적이 발생하였음을 볼 수 있다. 또한 홍수기간을 전·후로 유량측정성과의 특성이 크게 발생하여 기간분리를 고려하였으며, 분리된 구간에 대한 수위-유량관계곡선은 흐름이 0인 수위(Gauge Height of Zero Flow, GZF)를 초기치로 하여 대수축 그래프에서 곡선을 직선으로 표현할 수 있도록 조정하였으며, 직선으로 표현된 수위-유량관계곡선을 기본으로 하여 회귀분석을 통해 수위-유량관계곡선을 유도하였다. 곡선식을 작성할 때 측정된 유량측정성과 중에서 일관된 경향에서 벗어

는 자료는 유량측정성과의 수리특성 분석, 측정단계의 오류 검토, 측정방법의 타당성 등과 같이 종합적인 검토를 거쳐 이상치로 판정된 경우는 제외하였다. 제외된 이상치는 주로 겨울철의 하천 결빙에 따라 정확하게 측정되지 못한 경우이며, 고수위 구간 1.2m~1.5m 수위대의 2개 측정성과는 기본특성 분석을 수행한 결과 경향성에서 벗어난 경우로 수위-유량관계곡선식 개발시에는 제외하였다. 또한 유량측정성과를 초과하는 고수위 부분에 대해서는 2003년, 2004년 고수위 유량측정성과를 참조하여 고수위 곡선식을 개발하려 하였으나, 하천단면의 현저한 차이를 보여 고려하지 않았다. 이와 같이 작성된 전적비교의 수위-유량관계곡선식은 홍수기 이전(Ⅰ) 2개, Flume 공사기간 1개, 홍수기 이전(Ⅱ) 3개, 홍수기 이후 3개 구간으로 분리하여 작성하였다.

사방교도 전적비교에서 적용한 방법과 동일하게 적용하였다. 사방교 수위관측소 이설(2004년 12월) 이후 2년차로 실시한 유량측정으로 홍수기 전·후의 단면 변화가 다소 크게 발생하였다. 따라서 홍수기 전·후로 기간분리를 하였으며, 하천단면의 형상과 유량측정성과를 바탕으로 2개 구간으로 분리하여 수위-유량관계곡선식을 개발하였다. 2005년까지 저수위 유량측정시에는 측정단면의 영향으로 물의 흐름이 편기되고, 수심이 매우 작아서 측정단면의 부분적인

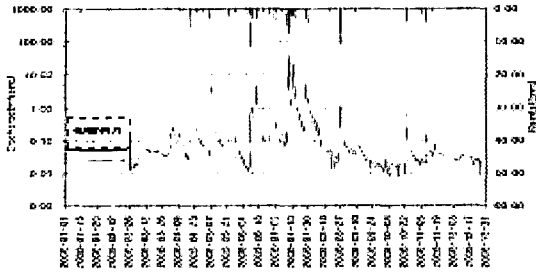


(a) 전적비교

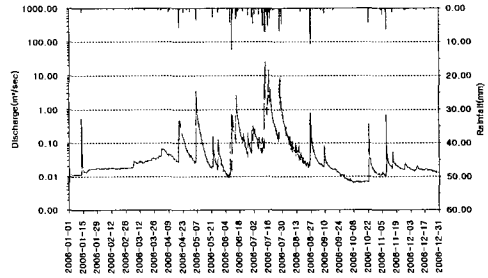


(b) 사방교

그림 4. 유량측정성과 및 수위-유량관계곡선



(a) 전적비교



(b) 사방교

그림 5. 강우-유출 현황

조정을 통하여 유량측정을 실시하였다. 그 결과 수위 값의 변화로 수위-유량관계에 영향을 미쳐서 저수위 구간에서는 매우 불안정한 상태를 보였다. 그러나 2006년부터 하상이 안정됨에 따라 저수위 구간의 유량측정은 양호한 결과를 보이고 있다. 중수위 구간인 0.4m~0.9m 수위대의 유량측정성과는 매우 불안정한 결과를 보이고 있다. 이의 원인으로는 수위관측소 이설시 Lift형 교량을 이용한 유량측정성결과를 비교 검토할 목적으로 Lift형 교량에서 도섭봉을 이용하여 측정할 결과로 고수속시 도섭봉의 고정에 대한 문제점이 발생한 것이 큰 원인이다. 그리고 0.9m 이상의 고수위 측정구간에 대해서도 역시 측정시도 조차 불가능한 경우였다. 따라서 고수위 구간에 대한 곡선식은 고수위 구간에 대한 단면변화는 보이지 않으므로 2005년 고수위 곡선식 참조, 2006년에 개발된 중수위 곡선식과의 연속성 고려 및 하류에 위치한 전적비교와의 유출률 검토 등을 종합적으로 판단하여 고수위 곡선식을 개발하였다.

개발된 수위-유량관계곡선식을 이용하여 관측수위를 유량으로 환산한 후, 주요 호우사상 및 월별 유출률 검토, 상·하류간 유량비교 등 수위-유량관계 곡선의 타당성을 검토한 후 필요시 이를 재조정하는 절차를 거쳐 확정된 수위-유량관계곡선식을 이용하여 유량자료를 산정하였으며, 그림 5는 전적비교 및 사방교의 10분 단위 유역평균유량과 유량을 도시한 그림이다.

또한, 설마천 시험유역에서는 유량측정시 현장에서

시료를 채취하여 부유사량 및 수질에 대한 분석을 수행하고 있다. 설마천에서 생성되는 수문자료는 우량, 유량 등 9종으로 10분 단위 자료를 기본으로 하며, 시 및 일자료로 변환하여 구성된다. 또한 수문자료 이외에 전적비교에서 사방교까지 하천 중·형단 측량을 수행하여(2003년) 이에 대한 측량성과도 함께 보유하고 있으며, 구체적인 자료내역은 표 3과 같다.

설마천 시험유역의 운영을 통해 확보된 유량측정성과의 정확도를 판단하기 위해 ISO-748 등에 제시된 방법을 기준으로 개별 유량측정성과의 불확실도를 산정하였다. 그림 7을 통해 알 수 있듯이 2004년에 비해 2005년, 2006년 측정성과는 상대적으로 정확도가 많이 개선되었음을 알 수 있다. 전적비교의 경우 2004년 총 불확실도 평균은 7.9%였으나 2006년에는 6.7%로 개선되었음을 알 수 있으며, 사방교에서도 2004년 8.4%에서 6.9%로 불확실도가 감소하

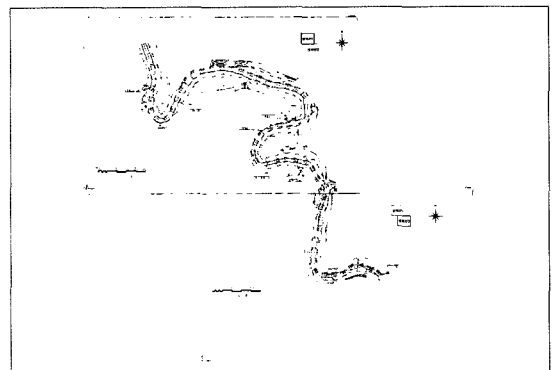


그림 6. 설마천 시험유역 측량성과

표 3. 등록자료 종류 및 내역

종류	지점명	시간 간격	자료 항목
지점수량	전적비교 외 5개지점	10분 /1시간/1일	
유역 평균수량	전적비교 사방교	10분 /1시간/1일	
수위 (하천, 지하)		10분 /1시간/1일	지하수위는 1시간 단위
유량측정 성과		수시	관측시점/종점 시각 및 수위, 수심, 유속, 유량, 단면적, 하폭 등
유량		10분 /1시간/1일	
수질 부유수량		유량측정시 유량측정시	pH, 전기전도도, DO, BOD, COD, SS, T-N, T-P, NO3-N, SO4, F, Cl
기상	비룡포대	10분 /1시간/1일	풍향, 풍속, 기온, 지중온도, 노점온도, 상대습도, 수증기압, 포화수증기압, 일사량, 일조시간, 증발량, 토양수분 6종
중첩단 측량성과	전적비교 - 사방교	-	전적비교(하류 200m)~사방교 (중·횡단 및 수준측량성과)

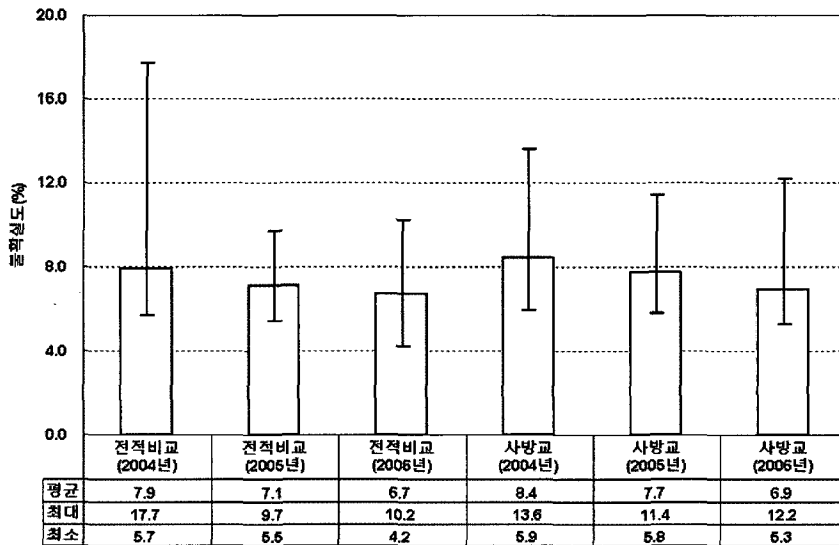


그림 7. 유량측정성과 불확실도 산정결과

였다(동절기 측정성과를 제외한 경우임).

설마천 시험유역의 경우 평·저수기에는 기본적으로 하폭이 좁아 측선수를 확보하기에는 한계가 있으며 유속도 느려 불확실도를 줄이기가 매우 힘든 상황이다.

또한 홍수기에는 산지하천의 특성상 수위가 급변하고 유속이 매우 빠르기 때문에 측정시간과 측선수 및 측정수를 확대하는데 제한이 있다. 이러한 원인으로 인해 비교적 많은 측선수와 긴 측정시간을 확보하였음에도 불구하고 개별 유량측정성과에 대한 불확실

도는 미국 지질조사국의 분류기준으로 'Fair'에 해당하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 현장상황을 고려하여 등유량 개념에 맞게 축선을 적절히 배분하고 점 유속의 측정시간을 늘린다면 현재의 수준보다는 불확실도의 크기를 일정수준 이하로 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 강우-유출 특성분석

##### 4.1 강우특성 분석

설마천 시험구역에서 관측된 우량자료를 이용하여 호우사상의 강우량 크기, 지속기간별 최대강우량, 6개 지점간 강우량 비교 및 주요 호우사상에 대한 시·공간분포 특성 등 기본적인 강우특성 분석을 수행하였다. 그 결과 전적비교 유역평균우량을 기준으로 2006년에는 총 56개의 호우사상이 발생한 것으로 분석되었다(12시간 무강우시간 기준). 표 4는 2006년에 발생한 56개 호우사상에 대해 강우량 크기별 분포를 나타낸 것으로, 이 중에 5mm 미만의 강우량을 보인 사상은 48.2%로 27개이고, 30mm 미만은 46개로 82.2%이며, 50mm 이상인 사상은 8개이다. 2006년도의 50mm 이상의 호우사상수는 2005년도와 비슷하였다.

2006년에 내린 강우량 중 최대 강우지속기간은 7월 14~18일의 호우기간인 96.00시간이었으며, 이때 설마천 유역에 내린 유역평균 강우량은 254.46mm를 나타내었다. 최대 강우강도는 11월 8~9일 발생한 강우로 7.74mm/hr이었다. 최대 강우지속기간은 2005년의 39.00시간보다 매우 길게 나타났으며, 최

대 강우강도는 2005년의 21.08mm/hr보다 매우 작게 나타났다. 2006년에 발생한 호우사상의 평균 강우지속기간은 12.05시간으로 2005년의 10.75시간보다는 큰 것으로 나타났다. 평균 강우강도는 1.70mm/hr로 2005년의 2.67mm/hr보다 작게 나타났다. 따라서 2005년보다는 비교적 강우지속시간이 길고, 최대 강우강도와 평균 강우강도는 매우 작게 나타나는 호우의 특징을 보이고 있다.

10분, 1시간 및 24시간 최대강우량은 각각 17.0mm, 41.0mm, 199.9mm이며, 그림에 함께 도시된 결과는 1999년 8월 임진강 대홍수시의 각 지속기간별 최대강우량과 2001~2006년의 결과를 함께 나타낸 것이다. 2005년과 비교하면 짧은 지속기간에서는 유사한 결과를 보이거나 지속기간이 길어질수록 2006년의 강우량이 크게 나타남을 알 수 있다.

그리고, 6개 우량관측소에서 관측한 강우량으로 각 호우사상별로 강우량의 정량적인 비교를 하였다. 비록 제한된 자료이기는 하나 지점간 강우량의 크기를 전반적으로 비교해 보면, 대부분의 호우사상이 포함되어 있는 200mm 이하의 영역에서는 설마리, 감악산, 빈배이 지점이 나머지 지점에 비해 전반적으로 작은 강우량 크기를 보였다. 특히, 빈배이 지점이 전반적으로 다른 지점에 비해 작은 강우량 크기를 보였다. 이는 관측소별 고도와 강우량의 관계로부터 판단해 볼 때 고도에 의한 영향보다는 해당 지점의 지형적인 특성에 의해 나타난 결과로 보여진다.

설마천 시험구역은 유역면적이 작고 우량관측소가 비교적 조밀하기 때문에 그림 9에서 알 수 있듯이 지점간의 강우의 시간분포는 큰 차이를 보이지 않으나, 공간분포의 경우에는 지점간 강우량 차이를 보여 호

표 4. 2006년 호우사상의 강우량 크기별 분류

강우량(mm)	0.5 이하	0.5 ~5.0	5.0 ~10.0	10.0 ~30.0	30.0 ~50.0	50.0 ~100.0	100 이상	계
사상수	1	26	8	11	2	4	4	56
백분율(%)	1.8	46.4	14.3	19.7	3.6	7.1	7.1	100
누가백분율(%)	1.8	48.2	62.5	82.2	85.8	92.9	100	100



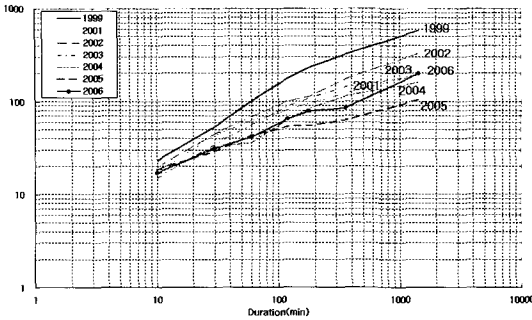


그림 8. 지시기간별 최대강우량

우사상에 따라 다양한 공간분포를 보이고 있다. 2006년의 호우중심은 전적비교, 설마리, 범륜사, 감악산 지점에 비교적 골고루 분포 하였다. 2006년에 가장 큰 강우량을 보인 호우사상은 7월 12~13일 호우사상으로 장마전선의 영향과 중국 남부에 머물던 태풍 '빌리스'에서 동반된 비구름이 장마전선에 유입되면서 전적비교 지점에 가장 많은 양의 비가 내렸으며, 전반적으로 유역의 서쪽 부근인 전적비교 지점에 호우 중심이 위치하고 있다.

#### 4.2 유출특성 분석

2006년의 설마천 시험유역의 유출특성은 2005년

과는 다른 특성을 보였다. 전적비교의 경우 6월 이전까지는 22%~69% 정도의 유출을 보였으나, 7월에는 많은 비로 유출이 많았으며, 이후 다시 유출이 지속적으로 감소하는 양상을 보이고 있다. 표 5는 2003~2005년의 총 유출과 2006년의 월별 강우-유출 현황을 나타낸 것으로, 겨울철의 유출(12월)은 하천결빙 등의 이유로 수위자료가 이상치를 보이기 때문에 산정된 월별 유출률은 정확한 값이라고 보기 힘들다.

설마천 시험유역은 기온이 낮아 용설 유출의 특성을 보이는 유역으로 2005년 12월과 2006년 1~2월에 내린 눈은 많지 않으나, 2006년 2월 중순이후 3월 하순까지 강우량이 적음에도 불구하고 많은 유출을 보이고 있어 용설 유출이 발생하였음을 알 수 있다. 4월부터 6월까지의 강우는 2005년보다 많은 양을 보인 관계로 유출률도 비교적 크며, 전반적으로 토양수분의 포화도도 높은 상태를 보이고 있다. 7월부터 8월 하순까지는 장마전선과 기압골 영향에 의한 많은 비로 유출은 크게 증가하였다. 특히, 7월 중·하순에 발생한 호우는 연강우량의 50% 정도에 해당하는 강우량을 보여 유출률이 크게 나타났으며, 그 이후는 30mm내외의 비교적 적은 호우로 유출률이 급격히 감소하는 유출 특성을 보였다.

2006년도 연간 유출률은 전적비교와 사방교 지점

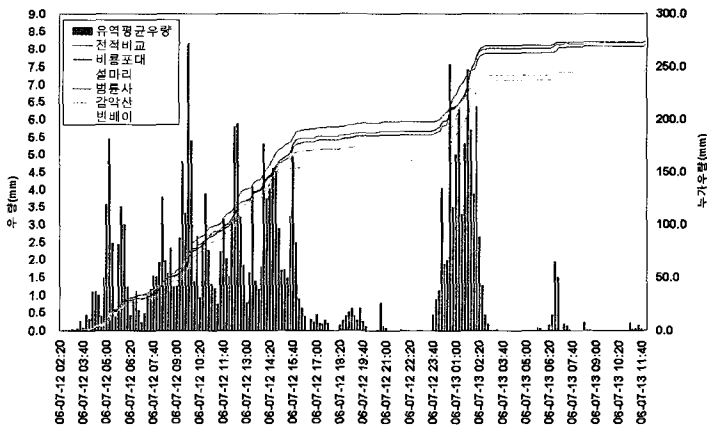
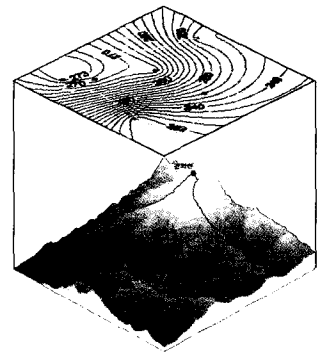


그림 9. 2006년 7월 12~13일 호우의 시·공간 분포



에서 각각 65%, 67%를 보였다. 이는 2005년도 연간 유출률인 61%, 62%(전적비교, 사방교) 보다는 많은 것으로, 2006년은 2005년에 비해 연강우량의 증가와 7월의 집중적인 호우로 유출이 상대적으로 커졌기 때문이다. 표 5에서 보듯이 두 지점에서 월별로는 부분적인 차이를 보이지만 연간 전반적으로 비슷한 유출률을 보이고 있다. 이것은 상·하류에 있는 두 지점간의 거리가 멀지 않고 유역의 특성이 유사한 결과로 판단되지만, 한편으로는 강우-유출 자료가 비교적 정확하다는 것을 의미한다.

### 5. 유역 물수지 분석

설마천 시험유역의 물수지 분석을 위한 자료로 유역 유입량 자료에는 강우( $P_{pre}$ )이며, 유역 유출량 자료에는 하천유출량( $Q_{stream}$ ), 증발산량( $E_{evt}$ ) 및 지하수 위 변화에 의한 유역 저류량( $\Delta S$ ) 있고, 기타에는 지하수 이용량( $Q_{gws}$ )이 있다. 다음과 같이 물수지식을 이용하여 계산하였으며, 관측자료의 분석은 2006년에

발생된 유역의 유입 및 유출량을 중심으로 수집된 자료의 정리를 통하여 다음과 같이 분석을 수행하였다.

$$P_{pre} = Q_{stream} + E_{evt} + \Delta S$$

#### 5.1 강우량 분석

먼저 유역의 유입량자료인 강우량 분석에는 6개 우량관측소에서 관측된 자료를 이용하여 연간 강우량을 산정하였으며, 유역평균우량 산정은 티센가중법을 적용하였다. 강우량 분석을 통하여 산정된 2006년 전적비교의 유역평균우량은 1,408.0mm이다. 강우량 분석에 대한 세부 내용은 4.1의 “강우특성 분석”에서 자세히 기술 하였으므로 여기서는 생략하기로 하겠다.

#### 5.2 하천유출량 분석

강우량 분석과 마찬가지로 3. “수문자료의 수집 및 검토”의 수위관측과 유량측정, 4.2의 “유출특성 분석”에서 자세히 다루었으므로 내용은 생략하기로 하

표 5. 월별 유출률(2003~2005, 2006.1~2006. 12)

기간(년/월)	전적비교			사방교		
	총강우량(mm)	총유출고(mm)	유출률(C)	총강우량(mm)	총유출고(mm)	유출률(C)
2003	1,924.70	1,419.10	0.74	1,947.00	1,357.80	0.7
2004	1,472.10	1,011.80	0.69	1,467.10	1013.4	0.69
2005	1,321.40	804.3	0.61	1,323.30	819.9	0.62
Jan-06	32.9	7.3	0.22	32.6	9.4	0.29
Feb-06	9.2	6.3	0.69	9.6	8.4	0.87
Mar-06	20.8	12.2	0.59	21.5	15.1	0.7
Apr-06	68.2	53.6	0.79	66.7	43.6	0.65
May-06	148.3	87.4	0.59	145.8	79.4	0.54
Jun-06	193.7	88.3	0.46	195.5	90.4	0.46
Jul-06	718.9	561	0.78	718	609.2	0.85
Aug-06	78.3	44.4	0.57	78.8	42.2	0.54
Sep-06	25.9	11.1	0.43	25.1	9.6	0.38
Oct-06	56.3	10	0.18	54.8	7.8	0.14
Nov-06	44.7	12	0.27	48.7	11	0.23
Dec-06	10.8	20.2	1.87	11	19.1	1.74
계	1,408.00	913.8	0.65	1,408.10	945.2	0.67

겠으며, 전적비교의 2006년 연유출률은 65%로 913.8mm/yr의 총유출고를 보였다.

### 5.3 증발산량 분석

증발산량 자료의 분석은 신뢰할 만한 자료의 부족과 비연속 관측으로 어려움이 따랐다. 따라서 다음과 같은 가정을 통하여 유역 증발산량을 산정하였다. 설마천 시험유역은 산림이 대부분을 차지하고 있어 증발산이 활발히 이루어진다고 보았으며, 갈수시의 하천 유출량 측정시 6.0mm미만의 일강우량은 하천 유출량에 기여하지 못하고 있음을 보았을 때 연간 발생한 강우량 중 일강우량 6.0mm미만의 합을 총 증발산량으로 추정하여 분석하였으며 산정된 증발산량은 332.8 mm/yr이다. 그리고, FAO Penman-Monteith Equation을 적용하여 잠재증발산량(ETo)을 산정한 후 작물계수(crop coefficient, Kc)를 곱함으로써 실제 증발산량(ETc)을 산정하였다.

그리고, 토양수분 감소량 (Fns, Soil Moisture Depletion Fractions for No Stress) = 0.5를 적용하여 최종 증발산량을 산정 하였으며, 산정된 증발산량은 385.1mm/yr이다. 본고의 물수지 분석에 적용한 증발산량은 후자의 경우로 선정하였다.

### 5.4 지하수위 변화에 의한 저류량 분석

설마천 시험유역에는 지하수위 거동을 관측할 수 있는 지하수위관측소가 2개소 운영되고 있으나, 지하수위 변화에 의한 저류량 분석을 위해서는 많은 지질

자료, 투수계수 및 방정식 해를 구하는 방법을 등을 수반하여야 어려움이 따르므로 여기서는 식(1)의 물수지 분석 연산식에서 저류량을 미지의 값으로 하여 이항정리를 통하여 산정하였다.

### 5.5 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 양수하여 사용하고 있었으며, 3개 군부대의 일일 지하수 이용량은 모두 103m<sup>3</sup>/day로 조사되었다. 다음은 유역내에 상주하는 설마리 주민의 지하수 이용량은 파주시 관내에 공급되는 상수도량, 즉 1인 1일 상수사용량 367ℓ 를 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 휴게소에서 개별적으로 지하수를 생활용수로 이용하고 있다. 또한 휴게소는 여름철에 피서객이 방문하여 쉼터로 이용되고 있는 곳으로 1개 휴게소의 방문객을 조사하여 전체적으로 확대하여 지하수 사용량을 추정하였다. 이로써 설마리 주민과 피서객의 물이용량은 433.2m<sup>3</sup>/day로 산정되었다. 설마천 유역내의 지하수 총 이용량은 536.2m<sup>3</sup>/day(=23.0mm/yr)이다.

표 6. FAO Penman-Monteith Equation을 이용한 실제 증발산량 산정(2006년)

구분	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	합 계
ETo(mm/mon)	131.8	170.8	184.1	185.4	164.3	146.1	132.2	1,114.70
Kc	0.15	0.15	0.63	1.1	1.1	0.68	0.25	-
ETc(mm/mon)	19.8	25.6	116	226.4	250.1	99.4	33.1	770.4
ETc×Fns(=0.5) (mm/mon)	9.9	12.8	58	113.2	125	49.7	16.5	385.1

표 7. 설마천 시험유역 연간 물수지 분석결과(2006년)

요 소		유출고(mm/yr)	비 고
유입량	강우량	1,408.00	• 설마천 시험유역 강우분석자료
유출량	하천유출량	913.8	• 수위관측 및 유량측정결과
	증발산량	-64.90%	• (진적비교 수위관측소)
	유역저류량	385.1	• FAO Penman-Monteith Equation 적용
		-27.40%	• 일강우량 6mm미만 = 332.8mm
	유역저류량	109.1	• 이항정리에 의한 추정치
		-7.70%	
기타	지하수이용량	23	• 현지조사 분석자료

### 5.6 분석결과

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

### 6. 결론

설마천 시험유역의 수문관측은 해를 거듭할수록 양적, 질적인 면에서 많은 향상이 있었다. 우량과 수위 관측기기의 철저한 유지관리 등을 통해 결측을 최소화시킬 수 있었으며, 지속적인 실시간 전송장비의 운영을 통해 실시간으로 현장의 상황을 파악할 수 있어 관측기기의 신속한 유지관리, 결측 최소화, 유량 측정회수 확대, 신속한 이상치 검토 등이 가능해져 자료의 질을 보다 높일 수 있었다.

관측된 우량과 수위 자료에 대해 일상적인 자료처리 시스템을 구축하여 운영함으로써 보다 정밀한 자료를 확보할 수 있도록 하였다. 정밀한 유량자료를 생성하기 위하여 유량측정에 보다 많은 시간과 인력을 투자하였으며, 측정된 유량측정자료는 불확실도 분석 등을 통해 오차를 더욱 줄일 수 있도록 측정방법을 지속적으로 보완하였다. 이를 통해 과거에 비해 상당히 개선된 유량측정자료를 확보할 수 있었으며, 관측된 자료를 검토 수정하는 절차를 거쳐 전적비교와 사방교에 대해 10분과 1시간 및 1일 단위의 유역평균우량 자료, 수위자료 및 유량자료를 구축하였다. 실시간 전송시스템 구축의 일환으로 개통한 설마천 시험유역의 홈페이지(<http://kict.datapcs.co.kr>)를 통해 실시간 우량 및 수위 자료와 자료처리절차를 거쳐 구축된 관측자료와 가공자료를 홈페이지의 게시판과 온라인 요청에 의해 일반 사용자에게 제공하고 있다.

관측기기의 교체, 추가 설치 및 꾸준한 유지관리와

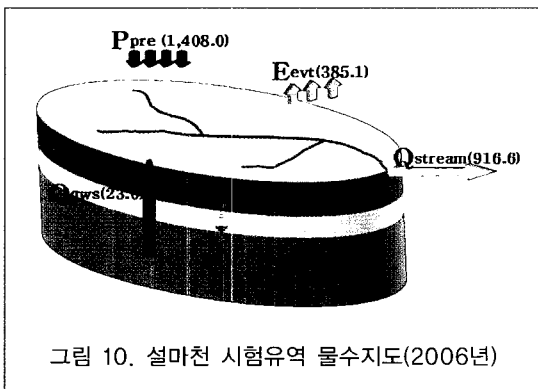


그림 10. 설마천 시험유역 물수지도(2006년)

수문관측을 통해 2006년에는 전적비교와 사방교에 대해 주요 호우사상 56개를 포함하여 10분 단위의 연속적인 강우-유출 자료를 획득하였으며, 이밖에도 수질, 부유사량, 기상 등의 자료를 확보하였다. 현장의 유량측정 정확도를 향상시킬 목적으로 추진되었던 Parshall Flume과 Cableway System을 이용한 유량측정을 수행한 결과 만족할 만한 수준의 측정값을 획득하였다.

마지막으로, 설마천 시험유역의 수문자료가 본격적으로 각종 수문분석에 활용되기 위해서는 앞으로도 장기간의 자료축적이 필요하므로 본 사업은 지속적으로 진행되어야 할 것이다. 또한 설마천 시험유역의 운영결과는 프런티어 연구사업과 연계한 국내 타 시험유역과 자료처리 기술의 전수 및 공유가 이루어지고 있어 수문관측 효율화 및 자료의 질적 제고를 향상시키고 있으므로, 이후 다른 소유역의 물 순환 과정을 한차원 높여 해석할 수 있는 기반을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- 윤용남 (1999), 공업수문학, 청문각.
- 경기도 (2003), 임진강(1지구) 하천정비기본계획.
- 한국건설기술연구원 (2006), 시험유역의 운영 및 수문특성 조사, 건기연 2006-062.
- 김동필, 김성훈 (2007), 2006년 설마천 시험유역 관측자료를 이용한 물수지 분석, 2007년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회.
- 한국수자원학회 (2000), 하천설계기준.
- 建設省 水文研究會 (1996), 水文觀測, 社團法人 全日本建設技術協會.
- Chow, V.T. (1964), Runoff, Sec. 14 in Handbook of Hydrology, McGraw Hill, New York. International Organization for Standardization (1996), Measurement of liquid flow in open channels -Velocity-area methods, ISO 748.
- Pilgrim, D.H. and Cordery, I. (1993), Flood Runoff, Ch.9 in Handbook of Hydrology, Maidment, D.R.(ed.), McGraw-Hill, New York.
- U.S. Geological Survey (1980), Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Chapter A8. Discharge Measurements at Gaging Stations, by Thomas J. Buchanan and W. P. Somers, Third Printing.
- World Meteorological Organization (1994), Guide to Hydrological Practices, Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and Other Applications, Fifth Edition, WMO-No.168, pp.5.8~5.15.
- Streamflow Measurement, Elsevier Applied Science Publishers ltd (1985), p.234~p.238. 