

2001년 설마천 사방댐의 수위-유량관계곡선 작성

정성원¹⁾, 김동필²⁾, 문장원³⁾

1. 서론

수문학 분야에서 가장 어려움을 겪고 있는 것 중의 하나는 정도 높은 수문자료의 부재이다. 이를 극복하기 위한 노력의 하나로 한국건설기술연구원은 1995년부터 설마천 시험구역의 운영을 통해 양질의 수문자료를 생성·축적하고 있다. 설마천 시험구역의 운영 목적은 산지 소유역의 신뢰성 있는 수문자료를 지속적으로 수집하여 정확한 수문순환과정을 파악하는데 있다. 이를 위해 우량, 수위, 유량, 수질, 기상 등 기본적인 수문관측 자료를 축적하고, 수집된 자료를 이용하여 유출 특성을 분석하는 것을 주요 내용으로 한다. 이밖에 신뢰성 있는 자료 획득을 위한 우량, 수위 등 각종 관측기기를 본 시험구역에 적용함으로써 적합성 검증과 측정 방법을 개선하고, 자료의 검증을 확보함과 동시에 시험구역의 연구성과가 관련 분야에 활용될 수 있도록 축적된 자료를 관리·제공하고 있다.

설마천 시험구역에서 운영되고 있는 사방댐 수위관측소는 토사유출을 억제하기 위한 사방댐을 위어로 활용하기 위해 설치한 수위관측소이다. 그러나 산지 소하천의 특성상 빈번한 토사 침식과 퇴적으로 위어의 기능을 하지 못하고 단면특성과 하상경사가 흐름을 지배하는 특성을 보이고 있다. 본 논문에서는 이러한 특성을 보이는 사방댐 수위관측소에서 2001년에 작성된 수위-유량관계곡선과 이로부터 산정된 유출량을 중심으로 산지 소하천 구역의 위어에서의 일반적인 수위-유량 관계곡선을 작성한 사례를 소개하고자 한다.

2. 설마천 시험구역 현황

설마천 시험구역은 경기도 파주시 적성면 설마리에 위치한 설마천 중류부의 영국군 전적비교를 출구로 하는 설마천 중상류 구역이다. 구역면적 8.50km², 유로연장 5.80km, 유로경사 2.3%인 전형적인 급경사 산지 사행하천이며, 하천형태는 수지상에 직각상이 결합된 형태이다. 시험구역의 지질학적 형상은 작은 절리가 많이 발달되어 있고, 엽리의 절리로 작용하는 지질구조상 초기 강우시에는 하천의 수위에 큰 변화를 보이지 않다가 파쇄대를 채우고 난 이후에 하천의 수위가 급격히 증가하는 양상을 보인다.

설마천 시험구역에는 현재 6개 유량관측소, 2개 수위관측소 및 1개 기상관측소가 설치되어 운영되고 있다. 일상적인 관측기기의 유지관리와 수문기상관측 및 관측자료의 검토 등 일련의 수문관측 및 자료처리 과정을 통해 양질의 지점우량(5지점), 수위(2지점), 유량측정성과(2지점), 수질(2

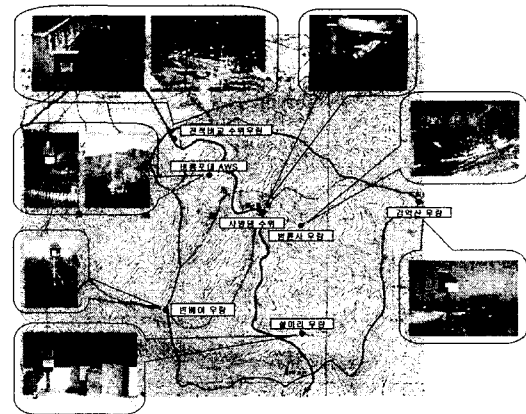


그림 1. 설마천 시험구역 구역도

1) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원 (E-mail: swjung@kict.re.kr)
2) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원 (E-mail: dpkim@kict.re.kr)
3) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원 (E-mail: jwmoon@kict.re.kr)

지점, 4종), 기상자료(1지점, 10종)를 10분 단위로 생성·축적하고 있으며, 관측자료로부터 유역평균우량과 유량자료를 산정하고 있다. 확보된 관측자료와 강우-유출자료는 각종 수문 관련 연구에 활용될 수 있도록 한국건설기술연구원에서 운영하는 수문 D/B에 등록되어 신청 즉시 일반에게 제공되고 있으며, 실시간 전송시스템의 구축에 따라 홈페이지(<http://kict.data.pcs.co.kr>)나 핸드폰을 통해서도 실시간으로 자료를 확인할 수 있다. 그림 1은 설마천 시험유역의 유역도와 수문관측소를 나타내고 있다.

3. 사방댐 수위관측소 특성

사방댐 수위관측소는 그림 2와 같이 산림환경연구소의 사방댐에 음파식과 실시간 음파식 수위계 2종을 설치하여 운영하고 있는 지점으로 설마천 유역의 중류부에 위치하고 있다. 유역면적은 5.08km², 유로연장 3.10km, 유로경사 2.6%로 전형적인 급경사 산지 하천의 특성을 보인다. 당초 사방댐 수위관측소는 토사유출을 억제하기 위한 사방댐을 위어로 이용하여 위어 공식으로 유량자료를 확보하기 위해 설치하였으나 산지 소하천의 특성상 위어 마루까지 토사가 퇴적되어 정상적인 위어 기능을 하지 못하고 있다. 위어 상류는 토사의 침식과 퇴적이 반복되는 전형적인 산지 하천의 특성을 보이며, 위어 하류는 위어에서 흐름이 자유낙하하는 특성을 보이고 있다(그림 3 및 4 참조). 따라서 위어 공식을 사용하지 못하고, 위어의 단면특성과 하상경사가 지배하는 일반적인 수위-유량관계곡선을 작성하여야 유량 자료를 확보할 수 있는 지점이다.



그림 2. 사방댐 수위관측소

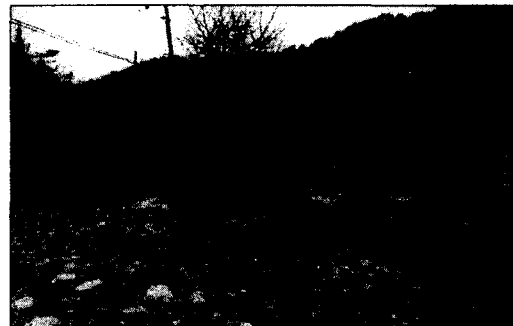


그림 3. 반복적인 토사 침식과 퇴적에 의한 하상경사의 변화 양상

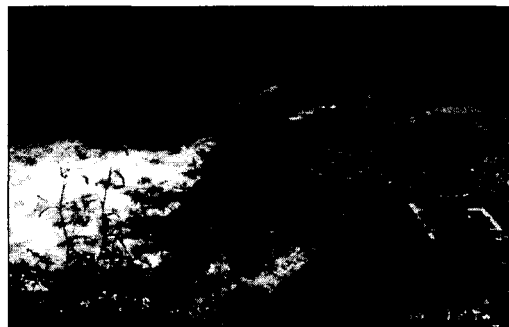


그림 4. 토사 퇴적에 의한 관측소 유지관리 및 홍수시 월류 전경

4. 유량측정

유량측정은 평상시에는 매주 한번씩 정기적으로 하며, 큰비가 오면 현장에 상주하면서 수위 변화에 따라 수시로 수행하였다. 그림 5는 디지털식 마그네틱 유속계(Marsh-McBirney사 Flo-mate 2000)를 이용하여 평상시에 유량을 측정하는 모습이다. 평상시는 사방댐 상류의 적정한 지점에서 유량을 측정하였으며, 홍수기에는 하류 약 100m 지점에 위치하는 계곡휴게소의 구름다리에서 유량을 측정하였다. 올해 수행한 유량측정은 모두 57회로 그림 6은 유량측정성과의 수위와 관측수위를 함께 도시한 것이다. 동절기에는 하천 결빙으로 실측수위와 관측수위가 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 유량측정성과 중에서 고수위에서 측정한 일부 성과는 유속이 너무 빨라 평균유속을 측정하지 못하고 유속계를 이용하여 표면유속을 측정하였으며, 이를 평균유속으로 환산하기 위해 표면유속의 80%로 가정하여 유량을 산정하였다. 관측수위의 최소치에 가까운 유량측정성과를 획득하였으나, 홍수기에 유역 출구점인 전적비교에 유량측정을 집중하므로 최대치 부근에서는 유량을 측정하지 못했다. 2001년에 측정한 유량 중에서 최소 유량은 6월 5일에 측정한 수위 0.263m의 0.003m³/s이며, 최대 유량은 7월 15일의 수위 0.945m의 15.839m³/s이다.



그림 5. 유량측정

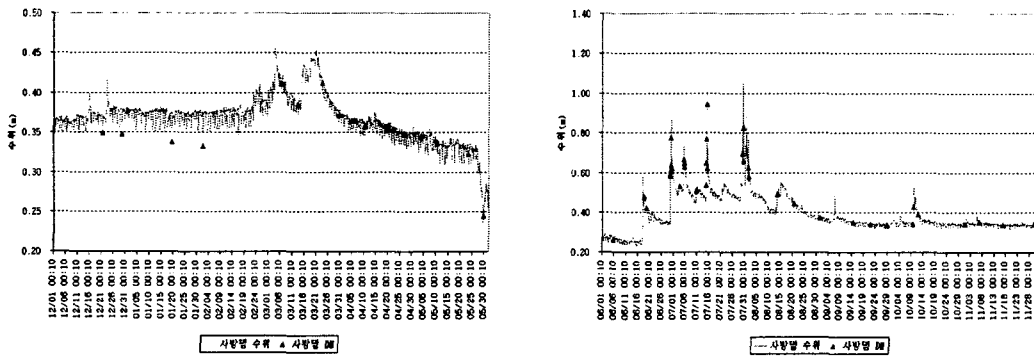


그림 6. 관측수위와 유량측정성과 수위의 비교

5. 수위-유량관계곡선의 작성

사방댐은 2001년 7월 14~15일 호우로 토사가 위어의 물넘이까지 다시 쌓여 수위-유량관계가 변화를 보였으므로 그림 7 및 표 1과 같이 7월 중순의 호우를 중심으로 2개의 수위-유량관계곡선으로 분리하여 작성되었다. 그림을 보면 7월 14~15일 홍수로 사방댐 상류에 토사가 더욱 쌓여 수위-유량의 관계에 변화가 있었음을 알 수 있다. 즉, 위어의 마루에 해당하는 0.48m에서 두 개의 곡선이 서로 교차한다. 이는 사방댐 위어의 상류에 큰 홍수로 인해 토사가 전반적으로 퇴적되어 위어 마루보다 높은 수위에서는 하상경사가 커졌으나, 위어 마루보다 작은 수위에서는 하천 바닥에 부분적으로 작게 형성되는 주수로에서 침식이 이루어져 하상경사가 반대로 작아졌기 때문인 것으로 판단된다.

사방댐 1 및 2의 곡선이 분리되는 0.32m, 0.48m는 위어의 통수단면이 변화하는 높이에 해당하는 수위로서 곡선식이 위어의 단면형상을 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 이는 측정된 유량측정

성과와 작성된 수위-유량관계곡선이 어느 정도 정확하였음을 말하고 있다.

저수위에서는 유량측정성고가 고수위에 비해 산포도가 넓기 때문에 곡선을 작성할 때 세심한 주의가 필요하며, 고수위에서도 유량측정성고가 상대적으로 많은 오차를 포함하고 있기 때문에 역시 주의가 필요하다. 저수위에서는 유량측정시 흐름이 0인 수위(GZF: Gauge Height of Zero Flow)와 위어단면을 참고하여 수위-유량관계곡선을 작성하였다. 사방댐 1과 2의 곡선식 모두 고수위에서 유량측정성고가 충분하지 못하였으므로 측정된 유량측정성고와 위어 단면을 이용하여 Stevens 방법으로 고수위의 수위-유량관계곡선을 연장하였다. 따라서 7월 15일과 7월말~8월초의 유량측정성고보다 큰 수위에 대한 일부 유량자료는 추정치이다.

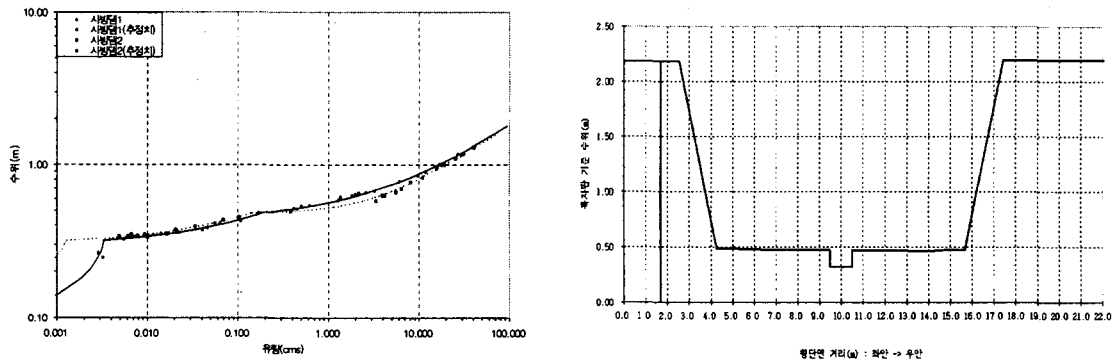


그림 7. 사방댐 유량측정성과, 수위-유량관계곡선 및 위어단면

표 1. 사방댐 수위-유량관계곡선식

적용 기간	경계 조건	수위-유량관계곡선식	비 고
2000. 12. 1 ~ 2001. 7. 14 22:50	$H \leq 0.318\text{m}$	$Q = -0.0649H^2 + 0.0426H - 0.0037$	사방댐1
	$0.318 < H \leq 0.484\text{m}$	$Q = 5.258(H - 0.294)^2$	
	$H > 0.484\text{m}$	$Q = 50.155(H - 0.423)^2$	
2001. 7. 15 01:10 ~ 2002. 3. 9	$H \leq 0.318\text{m}$	$Q = -0.0125H^2 + 0.0111H - 0.0010$	사방댐2
	$0.318 < H \leq 0.484\text{m}$	$Q = 4.261(H - 0.301)^2$	
	$0.484 < H \leq 0.945\text{m}$	$Q = 29.503H^2 - 8.111H - 2.842$	
	$H > 0.945\text{m}$	$Q = 50.698(H - 0.383)^2$	

주) 2001. 7. 14 23:00~7. 15 01:00의 유량값은 유량의 연속성을 위하여 조정과정을 거침.

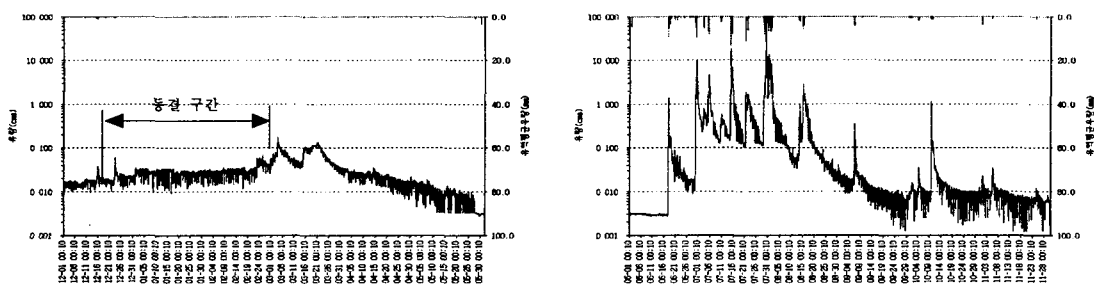
6. 유량 환산

확정된 수위자료와 수위-유량관계곡선을 이용하여 유량자료를 환산하였다. 일차적으로 작성된 수위-유량관계곡선을 이용하여 10분 수위를 유량으로 환산하여 주요 호우사상 및 월 단위의 기간에 대한 유출률 검토, 상·하류간 유량 비교, 2개 수위-유량관계곡선의 적용 구간에 대한 검토 등을 거쳐 작성된 수위-유량관계곡선이 타당한가를 검토하였으며, 필요시 작성된 수위-유량관계곡선을 재조정하는 절차를 거쳤다. 이러한 검토 과정을 거친 결과, 환산된 유량이 비정상적으로 나타나는 경우는 없었으므로 유량측정성과와 작성된 수위-유량관계곡선이 어느 정도 정확하였음을 알 수 있었다.

하상단면이 급격히 변해서 2개의 수위-유량관계곡선을 적용하는 시점에 대해서는 서로 다른 곡선식에 의해 산정된 유량자료가 불연속으로 나타날 수 있으므로 앞뒤의 적절한 구간을 선정하

여 그 시기에 측정된 유량측정성과를 참고하여 산정된 유량이 자연스럽게 변화하도록 수정하는 절차를 거쳐야 한다. 사방댐의 경우 7월 14~15일의 큰비로 수위-유량관계가 변화하였으므로 7월 15일 전후에 대해 산정된 유량을 부분적으로 조정하였다. 표 1의 1번과 2번 곡선식을 각각 적용하여 유량을 환산한 후, 하상단면이 변하는 수위 수문곡선의 상승시점부터 하상단면이 어느 정도 변화가 완료되는 수위 수문곡선의 하강시점까지 수위-유량관계곡선과 실측 유량측정성과를 참고하여 산정된 유량을 가감함으로써 홍수시 급격하게 변하는 하상단면의 변화를 고려할 수 있도록 유량을 조정하였다.

그림 8은 이러한 과정을 거쳐 최종적으로 산정된 10분 유량자료를 유역평균우량과 함께 도시한 것이며, 동절기에는 하천 결빙에 따라 수위를 적절히 측정하지 못하였으므로 산정된 유량에서 제외하였다.



(1) 2000. 12. 1~2001. 5. 31

(2) 2001. 6. 1~2001. 11. 30

그림 8. 사방댐 강우-유출 현황(유역평균우량 및 유량, 10분 단위)

7. 유출특성 분석

표 2는 2000년 12월부터 2001년 11월까지 1년간의 총 유출률과 월별 유출률을 나타낸 것으로 사방댐은 연 유출률이 68%였다. 참고로 유역의 출구점인 전적비교는 70%를 보였다. 이는 일반적인 기준에서 보면 다소 크게 나타나는 수준이지만, 7월에 연속적으로 집중된 비로 증발산량이 작고, 토양이 포화되어 내린 비가 대부분 유출에 기여하였기 때문인 것으로 판단된다. 월별 유출률에서 알 수 있듯이 2001년 설마천 사방댐의 유출 특성은 4월 중순 이전은 용설 유출, 6월 중순까지는 가뭄에 의한 매우 적은 유출, 8월 초순까지는 연속된 집중호우에 의한 많은 유출, 그 이후에는 적은 강우에 의한 적은 유출을 보이는 등 4가지로 대별되는 유출 특성을 보였다.

표 3은 주요 호우사상에 대한 직접유출률을 제시한 것으로 호우사상에 따라 다양한 유출률을 보여 사방댐의 직접유출률은 0.06~0.90의 범위를 보였다. 가뭄을 끝낸 6월 17~18일 호우는 적지 않은 강우량에 비해 3월 이후 지속된 가뭄으로 토양이 메말라 있어 매우 적은 유출률을 보였으며, 이어 7월 초순까지의 2개의 호우사상도 전적비교를 기준으로 0.58 및 0.29 정도의 비교적 작은 유출률을 보였다. 그러나 이후 8월 초순까지 연이어 발생한 5개 호우사상들은 0.34~0.90까지의 유출률을 보였으며, 7월 10일의 비교적 적은 호우를 제외하고는 0.62~0.90 정도의 큰 유출률을 보여 연이은 강우로 토양의 습윤 정도가 커 비교적 큰 유출이 발생하였음을 알 수 있다.

그림 9는 사방댐의 주요 호우사상에 대한 강우-유출 관계와 주요 호우사상에 대한 강우량 대비 유출률을 도시한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 강우에 대한 유출 거동이 정상적인 반응을 보이고 있음을 알 수 있다. 강우량이 증가함에 따라 유출률이 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 있지만, 일정한 패턴을 보이고 있지 않으며, 이는 선행강우의 영향, 강우 시공간적 분포 등의 여러

가지 인자에 의해 유출 반응이 이루어지고 있음을 반증하는 결과라고 판단된다.

표 2. 월별 유출률(2000.12~2001.11)

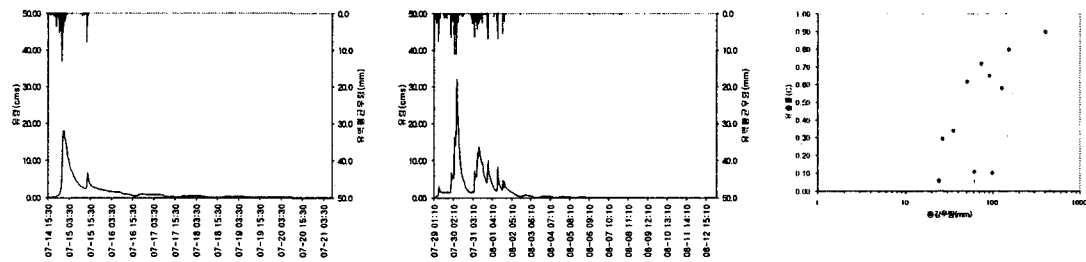
기간	총강우량 (mm)	총유출량 (mm)	유출률
2000. 12	44.5 ^{*)1)}	5.1 ^{*)2)}	0.11
2001. 1	43.1 ^{*)1)}	4.7 ^{*)2)}	0.11
2001. 2	32.9 ^{*)1)}	5.2 ^{*)2)}	0.16
2001. 3	10.2 ^{*)1)}	36.1	3.54
2001. 4	13.1	10.4	0.79
2001. 5	12.3	4.2	0.34
2001. 6	233.1	68.6	0.29
2001. 7	693.2	598.5	0.86
2001. 8	137.2	171.4	1.25
2001. 9	26.8	6.7	0.25
2001. 10	90.9	10.4	0.11
2001. 11	19.0	3.8	0.20
계	1,356.3	925.1	0.68

표 3. 주요 홍수사상 유출률

홍수사상	총강우량 (mm)	직접유출 (mm)	유출률
06/17 18:40 ~ 06/29 12:00	98.8	9.9	0.10
06/29 12:10 ~ 07/03 00:50	126.8	73.3	0.58
07/03 01:00 ~ 07/05 05:50	26.6	7.8	0.29
07/05 06:00 ~ 07/10 09:00	50.6	31.1	0.62
07/10 09:10 ~ 07/14 15:20	35.5	12.0	0.34
07/14 15:30 ~ 07/21 08:00	152.5	121.5	0.80
07/21 08:10 ~ 07/29 01:00	73.6	52.8	0.72
07/29 01:10 ~ 08/13 04:20	400.1	359.0	0.90
08/13 04:30 ~ 09/06 09:30	91.8	59.5	0.65
09/06 09:40 ~ 09/14 13:40	23.9	1.3	0.06
10/09 12:00 ~ 10/23 09:30	61.7	6.5	0.11

주1) 동절기 월강우량은 강설에 의한 결측으로 동두천 기상대의 자료를 사용함.

주2) 하천 결빙에 따른 동절기 자료 이상으로 목측자료를 이용하여 산정한 사방댐 유출고를 기준으로 함.



(1) 7월 14일~21일 홍수사상 (2) 7월 29일~8월 13일 홍수사상 (3) 강우량-유출률 관계

그림 9. 사방댐 주요 홍수사상의 강우-유출 관계

8. 결론

수위-유량관계곡선을 작성하기 위해서는 수위 및 유량측정성과의 점검, 곡선식 적용구간 결정 (곡선의 분리), 수위-유량관계곡선식 선정 및 유출 검토 등 단계별로 충실한 검토가 요구된다. 사방댐 수위관측소는 토사유출을 억제하기 위한 사방댐을 위어로 활용하기 위해 설치한 수위관측소 이나 산지 소하천의 특성상 빈번한 토사 침식과 퇴적으로 위어의 기능을 하지 못하고 단면특성과 하상경사가 흐름을 지배하는 특성을 보이는 지점이다. 하천단면자료와 수위 및 유량측정성과 자료가 어느 정도 충분히 축적된다면, 사방댐 지점과 같이 일반적인 경우가 아니더라도 하천의 흐름특 성과 흐름단면의 특성을 잘 표현하는 수위-유량관계곡선의 작성이 가능하다는 것을 보여주는 하나의 좋은 예라고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- 한국건설기술연구원(2001), 시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구, 건기연 20001-083.
- USDI, 1997, Water Measurement Manual, A Water Resources Technical Publication, Third Edition, U.S. Government Printing Office, Denver.
- WMO, 1994, Guide to Hydrological Practices, Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and Other Applications, Fifth Edition, WMO-No.168, pp.5.8~5.15.