

SAC-SMA 모형을 이용한 일 유출량 산정

An Estimation of daily runoff using SAC-SMA model

○강 경 석*, 서 병 하**

1. 서론

수자원 개발과 계획 및 최적의 관리를 위해서는 정확하고 효율적인 수문예측이 선행되어야 한다. 수문예측이라 함은 엄밀히 미래의 유역강우량과 유출량, 그리고 하천유량 및 그 시간적 분포를 예측하는 것을 의미한다. 유역의 유출과정은 지형 및 토양, 토지이용상황, 선행 수문사상 등에 따라 달라지는 매우 복잡한 양상을 나타내며, 유역의 강우-유출 관계가 비선형성을 내포하고 있어 유역 유출의 정확한 예측은 매우 어려운 문제이다.

현재 국내 하천의 유출량 산정을 위한 모형으로는 홍수유출 모형과 저수유출 모형으로 크게 구분할 수 있다. 홍수 유출 모형으로는 저류함수법(storage function method)에 근간을 둔 홍수 유출 모형이 각 수계별로 수립되어 있으며, 이는 며칠간에 걸쳐 발생하고 소멸하는 홍수 사상만을 모의할 수 있다. 바꾸어 말하면 강우의 발생 유무에 상관없이 장기간에 걸쳐 연속적으로 유출을 모의할 수 있는 체계가 갖추어져 있지 못하다고 할 수 있다. 저수유출 모형으로는 유역환경이 우리나라와 비슷한 일본에서 개발된 탱크모형이 널리 적용되고 있으나 이 모형의 'black box'적 성격으로 인하여 근래에는 토양함수량에 관한 실제 기구를 명시적 개념화한 모형에 대한 적용성 검토가 시도되고 있다.

일반적으로 유출 모형은 매개변수를 추정하지 않고 유역 특성에 따라 유출량을 추적하는 분산형의 물리적 모형이 바람직하지만, 실제 유역에 적용하는 데는 문제가 있어 여러 가지 수식으로 단순화하여 자연 현상을 예측하게 된다. 오히려, 기상 특성과 유역 특성의 입력 자료를 간단히 하고, 모형의 구조와 매개변수도 단순화하여 강우-유출 현상을 정확하게 예측할 수 있다면 집중형, 개념적 모형이 적합할 수도 있다.

따라서 본 연구에서는 토양의 물 이동 경로가 비교적 실제 구조에 가깝도록 설계된 토양함수모형(Sacramento Soil Moisture Accounting Model, SAC-SMA)과 HEC-1의 Kinematic wave 하도추적 모형을 결합하여 만든 미 기상국의 NWS-PC 모형을 선정하여 유역 유출 모형인 Sacramento 모형 및 하도 추적 모형의 알고리즘을 분석하고 이들을 모듈화 하는 방안을 모색하고, 실제 유역에 적용하여 모형변수의 검정을 실시하는데 그 목적이 있다.

2. SAC-SMA 모형의 구성

SAC-SMA 모형은 그림 1에서 보는 바와 같이 유역을 투수 구역과 불투수 구역으로 나누고, 투수 구역내 토양층의 수분 저류형태에 따라 상부 토양대(upper zone)와 하부 토양대(lower zone)로 구분한다. 이러한 수분 저류형태의 분류는 강우가 발생하여 토양층 위와 토양층을 통하여 물이 언직, 수평방향으로 이동하고 종국에는 유출을 형성하는 유역의 수문 과정을 간단하고 효과적으로 나타내는데 그 목적이 있다. NWS-PC에서 모의 계산되는 유출성분은 다음의 다섯가지로 구분된다.

- 1) 영구적인 또는 일시적인 불투수 영역으로부터 유출되는 직접유출(direct runoff)
- 2) 상부 토양대의 자유수 저류공간이 포화되거나, 강우강도가 침투율을 초과할 때 발생하는 지표면 유출(surface runoff)
- 3) 상부 토양대의 저류된 자유수의 횡방향 배수에 의한 중간유출(interflow)

* : 인하대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

** : 인하대학교 공과대학 토목공학과 교수

- 4) 보조 기저유출(supplemental baseflow)
- 5) 기본 기저유출(primary baseflow)

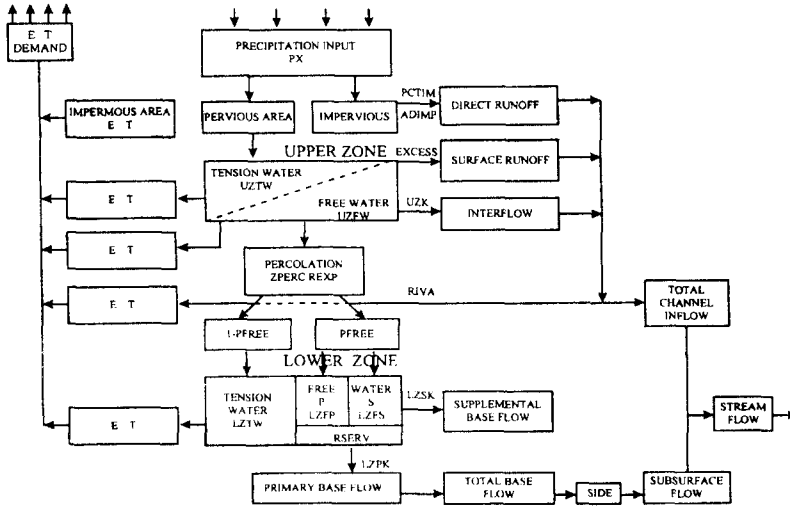


그림 1. Sacramento 토양 함수 상태 계산 모형의 모식도

3. SAC-SMA 모형의 적용 및 해석

본 장에서는 SAC-SMA 모형의 운영에 필요한 기본 입력자료를 작성하고, 모형 매개변수의 검정 및 검증, 그리고 민감도분석을 통하여 모형의 매개변수를 추정하고자 하며, 이를 이용하여 모형의 적용 가능성을 검토하고자 한다. 그러기 위해서는 많은 연구성과와 기초자료가 풍부한 지점을 선택하여야 한다. 따라서 장기간의 수위-유량관측 기록을 보유하고, 하상 변동이 비교적 적고, 일관성 있는 수위관측 기록을 보유하고 있는 경안, 홍천, 간현, 청미 등 4개 수위관측소와 소양강댐 및 충주댐 지점을 대상구역으로 선정하였다.

3.1 모형의 입력자료 구성

유역의 유출량을 모의하기 위해서는 유역의 평균우량과 유역증발산량을 추정하기 위한 자료가 필요하다. 본 모형에서는 유역평균강우량과 계기증발량 자료가 모형의 입력자료가 된다. 모의된 계산유량의 정도를 통계적 또는 다른 방법으로 비교할 수 있도록 실측 유량자료가 기본 입력자료에 포함될 수 있다.

가. 강우량 및 증발산량 자료

본 연구에서 선정된 대상구역별 강우량 관측소를 파악하고, 각 대상지점의 유역평균 강우량은 Thiessen법에 의하여 산정하였다. 또한 증발산량 산정은 대상구역 인근의 증발량 자료와 증발산계수(평균잠재증발산량/평균계기증발량)를 이용하여 산정하였다. 각 대상구역별 인근에서 계기증발량을 측정하는 기상청 측후소는 소양강댐 및 홍천지점은 춘천측후소, 청미와 경안지점은 수원측후소, 충주댐과 간현지점은 충주측후소의 관측 자료를 이용하였다. 또한 증발량을 잠재증발량으로 환산하기 위해 사용된 증발산 계수는 현재 우리나라가 가지고 있는 기상 관측 자료로서 계산이 가능한 Penman식(이광호, 1972)에 의해 산정된 잠재증발산량과 서울 측후소의 '67~'88년간의 평균 계기 증발량을 이용하여 산정한 증발산계수(한국수자원공사, 1990)를 이용하였다.

나. 유출량 자료

하천유량이란 하천 수로상의 어떤 단면을 통과하는 단위시간당의 수량을 말한다. 우리나라에서는 정기적 또는 부정기적인 유량관측에 의하여 마련된 수위-유량 관계 곡선식을 이용하여 하천의 유량을 환산한다. 그러나 국내 수위관측소의 수위-유량 관계 곡선식의 신뢰도는 그리 높지 않은 경우가 많으므로 유출량 산정 이전에 수위-유량 관계 곡선식의 검토가 먼저 이루어져야 할 것이다. 따라서 대상지점중 수위관측소에 대한 기존의 수위-유량 관계식(한국건설기술연구원, 건설부, 1994)을 검토한 결과 관측소별로 잦은 하상변동과 수위관측 기록의 일관성 결여로 환산된 유출량을 신뢰할 수 없어 각 관측소별로 결측자료가 없이 연속적으로 측정된 수위자료를 가진 연도에 적합한 수위-유량 관계 곡선식을 새로이 작성하였으며 그 결과는 표 3.1과 같고, 이를 이용하여 유출량을 산정하였다. 또한 충주댐 및 소양강댐 지점은 관측된 유입량 자료가 존재하므로 한국수자원공사의 유입량자료를 그대로 이용하였다.

표 3.1 수위 관측소의 수위-유량관계식

수위 관측소	수위-유량관계 곡선식	상관계수(R^2)	비고
경안	$Q = 36.467h^{2.9013}$	0.9750	84, 85 자료 이용
홍천	$Q = 21.405h^{2.8517}$	0.9938	84, 85 자료 이용
청미	$Q = 48.69h^{2.1973}$	0.9753	86, 87 자료 이용
간현	$Q = 37.939h^{2.8877}$	0.9776	84, 85 자료 이용

3.2 SAC-SMA 모형의 매개변수 검정 및 모형검증

일반적으로 모형의 매개변수를 추정하는 방법에는 자동검정법과 수동검정법이 이용되고 있다. SAC-SMA 모형의 매개변수 검정은 수문곡선을 분석하여 추정하는 수동검정과 Rosenbrock 제약 최적화 알고리즘을 이용하여 추정하는 자동검정을 선택적으로 사용할 수 있다. 본 연구에서는 Brazil과 Hudlow(1980)가 수동검정과 자동검정의 조합시 발생하는 불이익을 극복하기 위하여 제안한 바와 같은 3단계, 즉 초기는 수동검정으로, 중간은 자동검정으로, 최종은 두 방법을 조합하여 검정 절차를 수행하였다. 모형의 초기 변수를 얻기 위하여 NWS-PC 모형의 사용자 설명서에 기술된 절차에 따라 관측 수문곡선과 전 유역의 토양특성 및 모형변수간의 관계를 분석하였다. 수동검정은 관측과 모의 유출량 간의 오차를 도식적으로 비교 판단하는 과정을 통해 시행착오법으로 수행하며, 자동검정은 선정된 목적함수를 이용하여 직접탐색법(direct search techniques)에 의해 최적치를 구하는 최적화 기법에 의해 수행되고, 자동검정되는 매개변수는 사용자가 임의로 선정하도록 되어 있다. 본 모형에서 자동검정시 사용자가 선택할 수 있는 목적함수는 5개가 있으며, 본 연구에서는 관측유량과 계산유량의 시간대별 편차제곱합을 최소화하는 아래식을 목적함수로 설정하였으며, 자동검정되는 매개변수는 사용자가 임의로 선정하도록 하였다.

이와같이 결정된 각 대상유역의 매개변수는 다음의 표 3.2와 같고, 매개변수 추정 및 모형 검증시 계산 및 관측된 수문곡선을 비교하면 그림 3.1~그림 3.6과 같다.

$$\text{Object Function} = \text{Min} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_c)_i^2$$

$$\text{subject to } Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}$$

여기서, Q_o 는 관측유량, Q_c 는 $Q(\Pi, \Theta)$ 로서 계산유량이며, Q_{\min} , Q_{\max} 는 각 매개변수의 상·하한값이고 Π 는 입력자료, 즉 강우량을 나타낸다.

표 3.2 SAC-SMA 모형의 매개변수 추정 및 검정 결과

변수명	충주댐	소양강댐	경안	청미	간현	홍천
UZWIM	64.656	53.433	79.972	36.503	20.296	20.708
UZFWIM	45.650	15.001	26.490	30.540	27.296	73.792
UZK	0.396	0.394	0.412	0.142	0.300	0.266
PCTIM	0.250	0.243	0.110	0.096	0.105	0.094
ADIMP	0.402	0.351	0.266	0.414	0.096	0.153
RIVA	0.113	0.112	0.032	0.024	0.061	0.050
ZPERC	19.916	19.916	120.40	5.000	5.000	35.262
REXP	0.572	0.572	0.299	0.393	0.489	0.248
LZWIM	50.01	78.078	35.450	31.080	45.853	83.764
LZFSM	99.89	34.860	200.415	130.350	35.493	60.263
LZFPM	299.19	68.067	628.400	350.160	400.987	558.090
LZSK	0.067	0.119	0.035	0.021	0.034	0.041
LZPK	0.032	0.040	0.003	0.003	0.013	0.003
PFREE	0.367	0.367	0.315	0.133	0.367	0.400
RSERV	0.345	0.345	0.095	0.189	0.355	0.233
SIDE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

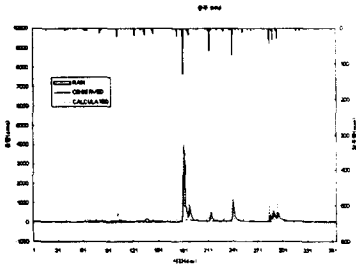


그림 3.1 관측 및 계산유량 비교(충주'94)

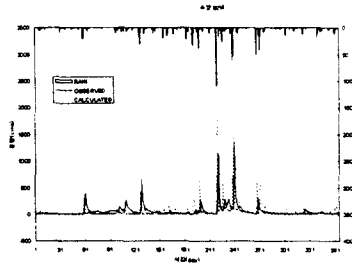


그림 3.2 관측 및 계산유량 비교(소양'92)

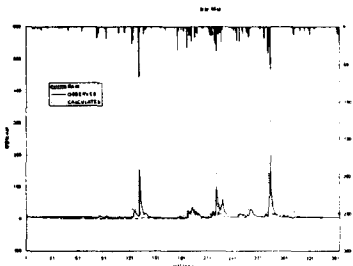


그림 3.3 관측 및 계산유량 비교(경안'85)

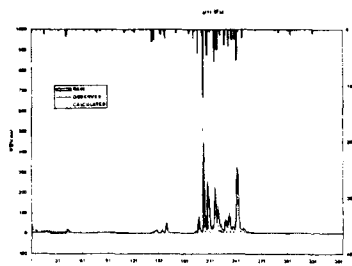


그림 3.4 관측 및 계산유량 비교(청미'87)

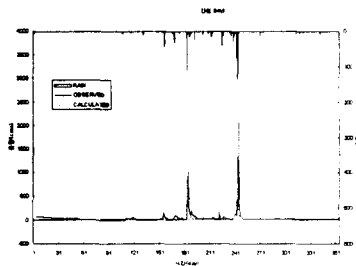


그림 3.5 관측 및 계산유량 비교(간현'84)

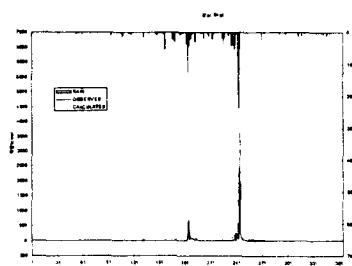


그림 3.6 관측 및 계산유량 비교(홍천'84)

3.3 민감도 분석

민감도 분석은 매개변수 변화에 대한 적합도 기준을 제시하는 것으로 매개변수의 중요성과 모의발생 결과를 분석하는데 도움을 준다. 특히, 모형 매개변수의 민감도는 모형의 구조에 종속되어 있으므로, 이는 모형의 구조의 정량적 지표와 유역의 수문반응을 나타내기 위한 모형 능력의 지표로 사용될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 모형에서 적용되는 매개변수들의 상대적 중요성을 정량적으로 표시하는 것으로 모형의 결과에 상대적으로 큰 영향을 갖는 매개변수를 파악할 수 있는 상대 민감도 분석을 실시하였다. 분석방법은 앞에서 추정된 각 매개변수들에 대해 -50% ~ 50% 구간에 대해 10%씩 일률적으로 가감시켜 가며 유출량에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과는 그림 3.7~그림 3.12와 같다.

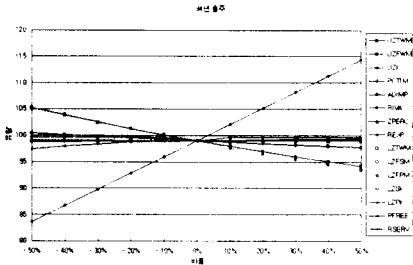


그림 3.7 민감도 분석 결과(충주'94년)

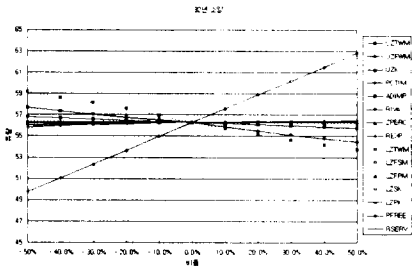


그림 3.8 민감도 분석 결과(소양'92년)

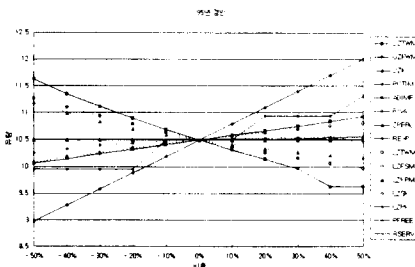


그림 3.9 민감도 분석 결과(경안'85년)

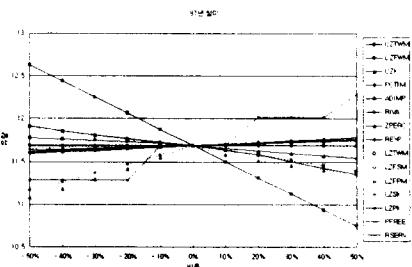


그림 3.10 민감도 분석 결과(청미'87년)

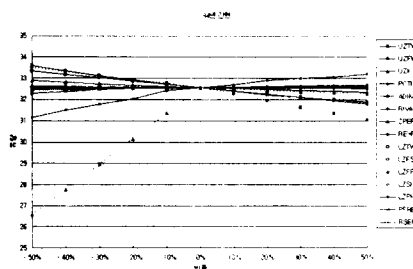


그림 3.11 민감도 분석 결과(간현'84년)

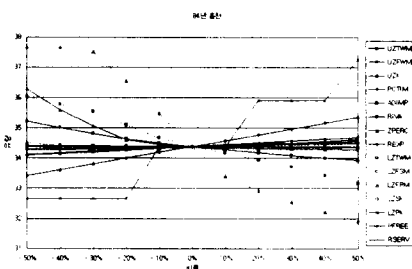


그림 3.12 민감도 분석 결과(홍천'84년)

3.4 모형의 검증

앞에서 산정된 매개변수를 이용한 모형을 검증하기 위하여 충주댐과 소양강댐 지점은 '90년, '91년, '93년, '95년도의 댐 유입량 자료를 이용하였고, 경안, 청미, 간현, 홍천 수위 관측소는 '86년 ~ '95년도의 유출량 자료중 결측이 없고 수위 - 유량 관계곡선식이 개발되어 있는 연도를 선정하여 검증에 사용하였다.

검증시 사용된 유출량 자료는 경안 수위 관측소는 '92 ~ '93년, 청미 수위 관측소는

'93 ~ '94년, 간현 수위관측소는 '89 ~ '90년, 홍천 수위 관측소는 '89년과 '92년도의 유출량을 이용하였으며, 그 결과는 다음 표 3.3과 같다.

표 3.3 대상유역의 일 유출량 계산 결과

대상지점	년도	\bar{Q}_o (cms)	\bar{Q}_c (cms)	상대오차 (%)
충주	'90	234.62	237.12	1.06
	'91	143.64	131.73	8.29
	'93	187.86	146.72	21.90
	'95	179.04	160.33	10.45
소양강	'90	139.70	120.99	13.39
	'91	57.55	44.75	22.24
	'93	70.11	53.16	24.18
	'95	95.45	79.07	17.16
경안	'92	13.89	14.86	6.98
	'93	16.91	19.16	14.49
청미	'93	16.77	11.72	30.11
	'94	19.22	14.69	23.57
간현	'89	37.60	30.60	18.61
	'90	34.42	46.41	34.83
홍천	'89	24.99	27.94	11.80
	'92	27.84	22.31	19.86

4. 결론

본 연구에서는 토양의 물 이동 경로가 비교적 실제 구조에 가깝도록 설계된 토양 함수 모형(Sacramento Soil Moisture Accounting Model, SAC-SMA)과 HEC-1의 Kinematic wave 하도추적 모형을 결합하여 만든 미 기상국의 NWS-PC 모형을 유역 유출 모형인 Sacramento 모형과 하도 추적 모형의 모형구조와 알고리즘을 분석하고 이들을 모듈화 하는 방안을 모색하였으며, 한강유역 상류에 위치한 충주댐과 소양강댐, 그리고 경안, 청미, 간현, 홍천 수위표지점에 적용하여 모형의 적용 가능성을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 미국 홍수 예경보 시스템(NWSRFS)의 일부를 PC화한 NWS-PC 모형의 구조와 알고리즘 분석 및 입출력 체계를 분석하고, 그중 유출 모형인 Sacramento 모형을 모듈화 시스템의 적용이 가능하도록 강우-유출 과정의 각 성분 모형별 입출력 구조를 분석하고, 모형을 수정 개발하고, 한강유역의 상류유역인 충주댐유역과 소양강댐 유역 및 경안, 청미, 간현, 홍천 수위관측소에 대해 모형 매개변수를 추정하고 검증하여 각 대상유역별로 매개변수를 결정하였다.
- (2) SAC-SMA 모형의 16개 매개변수를 유출량에 대한 민감도 분석을 수행한 결과 대상 유역별로 유출량에 민감한 매개변수를 선정할 수 있었으며, 이는 매개변수 추정시 유용하게 이용되리라 판단된다.
- (3) 본 연구에서 분석한 모형은 강우-유출 모형의 분류상으로는 연속 모의 모형에 속한다. 즉 홍수기 및 비홍수기의 전기간에서의 소유역의 유출량을 모의한다. 따라서 본 연구에서는 일 자료를 사용하여 일 단위의 유출량을 모의 계산하였다. 그러나 모형의 입력 자료의 시간간격은 시간단위로 입력하게 되어 있어 홍수관리에도 적용이 가능할 것으로

판단된다. 하지만 자료의 수집 및 신뢰성등 여러 가지 문제가 있어 향후 신뢰성 있는 수문자료를 바탕으로 일단위 장기 유출은 물론 시간 단위의 홍수 유출량 산정에도 적용하여 매개변수를 지속적으로 검정 및 검정한다면 이·치수 목적 유역 유출 모형으로 채택될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 노재경(1991), 토양 수분 저류에 의한 일 유출량 유역 모형, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
- 박노혁(1997), 저수지의 실시간 홍수조절을 위한 의사결정 지원 시스템 개발, 충북대학교 대학원 박사학위 논문.
- 배덕효, 조원철(1995), 물리적·개념적 연속 유출모형에 의한 유출해석, 한국수자원학회지 제 28권 제 6호, pp193~202.
- 신용노(1995), 일 유출 모형(NWS-PC)의 매개변수 산정 및 적용, 충남대학교 대학원 석사학위 논문.
- 이광호(1972), Penman 식과 기상요소를 이용한 증발산 모델에 관하여, 한국수문학회지 6(2).
- 정하우, 이남호, 박승우(1990), 하천 일 유출량의 실시간 예측, 한국농공학회지 32(3), pp. 47-55.
- 한국수자원공사(1994), 한강수계 다목적댐 하루 연속유출 모형과 동역학적 하도추적 모형 연구(1차년도 : 강우-유출 연속모의 모형).
- Armstrong, B, L.(1978), Derivation of initial soil moisture accounting parameters from soil properties for the National Weather Service River Forecast System, NOAA Tech. Memo. NWS HYDRO-37, office of Hydrology washington, D. C. .
- Burnash, R. J. C., R. L. Ferral and R. A. McGuire(1973), A generalized stream flow simulation system conceptual modeling for digital computers National Weather Service, California Dept. of water Resources.
- Peck E. L.(1976), Catchment modeling and initial parameter estimation for the National Weather Service River Forecast System, NOAA tech, Memo. NWS HYDRO-31, office of hydrology, Washington, D. C. .
- Tabios III, G., Obeysekera, J. T., and Salas. J.D. (1986), Hydrology and water Resource Program, Colorado State Univ. , Ft Collins, Colorado.
- Warren Viessman, Jr., John W. Knapp, Gary L. Lewis, Terence E. Harbaugh(1977), Introduction to Hydrology(2nd Edition), IEP, New York.