

수문모형과 매개변수의 이해

Introduction of Hydrologic Models and Parameters

장 중 석*
Jang, Jung-Seok

1. 머리말

물의 순환과정 중에서 인간생활에 가장 밀접한 영향을 주는 것이 유출과정이라고 할 수 있다. 유출(runoff)이란 지상으로 떨어진 강우의 일부분이 지표 또는 하천으로 흐르는 과정을 말하는 것으로서 하천의 유출량은 이수 및 치수의 양면에서 가장 중요하고 핵심적인 수문량이다(박성우, 1995).

일반적으로 하천유출량은 수문관측을 통하여 얻을 수 있지만, 우리나라는 유량자료를 산정할 수 있는 수문 관측소의 수가 제한적이고, 관측자료의 신뢰성도 낮은 편이다(김현준, 2001). 또한 필요한 지점에서 항시 유출량 관측치가 존재하지도 않으며, 관측기록이 짧아 설계의 기준이 되는 빈도해석이 불가능한 경우도 많으며, 모든 수계나 하천에 대하여 유출량을 측정하는 것도 비경제적이다(박성우, 1995). 그러므로 과거 유출자료에 대한 평가와 보완 및 정도의 개선(김현준, 2001), 수문조건의 변동에 따른 유출량 변동상황의 예측(박성우, 1995), 수문분야 연구의 도구로 활용하고 정확성과 신속성을 보장받으면서 수자원 문제를 해결하는 수단(윤용남, 1996)으로 수문모형이 활용되고 있다.

그러나 수문순환을 나타내는 실세계는 대단

히 복잡한 특징을 가지는 유역으로 구성되어 있고, 유역의 유출은 복합적인 요인으로부터 발생되므로 특정 유역의 강우-유출관계를 단순하게 수문 모형으로 나타낸다는 것은 매우 어려운 일이다. 유역 유출현상에 대한 이해의 부족, 수문모형 구조의 불확실성, 모형에 적용한 자료의 불확실성으로 인하여 모형으로부터의 결과가 실제의 유출현상과 다를 수도 있다. 일반적으로 수문모형에서는 이와 같은 불확실성을 제거하는 방안으로 유역특성 및 유출과정의 주요 인자를 매개변수화하고 이들 매개변수를 실측자료에 근거하여 보정함으로써 수문모형의 적정성을 검토하고 신뢰성있는 수문분석 결과를 얻으려고 한다.

본 소강좌에서는 강우-유출관계를 나타내는 수문모형의 종류와 특성을 살펴보고 수문모형을 적용하는 방법, 수문모형에서의 매개변수의 역할과 보정방법 등을 개략적으로 살펴봄으로써 수문모형과 매개변수에 대한 이해를 돕고자 한다.

2. 수문모형의 개념

수학적인 의미에서 볼 때 모형(model)이란 원형계(prototype)의 거동을 손쉽게 파악하기 위하여 일련의 가정과 공식 및 절차를 도구로

*농업기반공사 조사설계처(jjs@karico.co.kr)

하는 기법이라 할 수 있다(윤용남, 1996). 따라서 축소된 실물도 모형이 될 수 있고, 원형의 변화모양을 나타내는 어떤 수학적 공식도 모형이 될 수 있다(박성우, 1995). 이와 같이 유역의 각종 수문과정(hydrologic processes), 즉, 침투 및 차단, 지표수 유출과 지하수 유출 등 강우-유출간의 공간적 변화를 함수관계로 표현하여 신속하게 해를 구할 수 있도록 하는 공학적인 응용도구를 수문모형이라고 할 수 있다.

수문모형은 일반적으로 다음과 같은 다섯 가지의 기본적인 요소로 구성되어 있다. 1) 유역의 지형인자(system geometry), 2) 입력자료(input), 3) 지배방정식(governing equation), 4) 초기 및 경계조건(initial and boundary condition), 5) 출력(output)이 그것이며 이들 요소의 결합과 응용에 따라 다양한 수문모형이 구성될 수 있다(Singh, 1995).

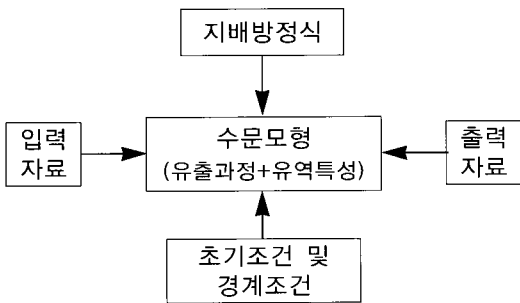


그림 1. 수문모형의 구성요소 (Singh, 1995)

일반적으로 수문모형은 우선 물 순환과정을 하나의 폐합계(closed system)로 보고 이 계의 입력 및 출력자료를 정의하게 된다(윤용남, 1996). 입력자료로는 강수량 등의 수문기상자료와 유역특성자료 및 유출과정을 수식화하는 지배방정식과 이들의 초기 및 경계조건을 정의해 줌으로써 일련의 유출과정을 모의할 수 있게 된다. 이러한 수문모형은 수자원시스템의 어느 부분에 필요한 수문량을 예측하는데 이용

될 수 있고, 각종 관련 설계인자를 변경시킴으로써 구조물을 시공하기 이전에 여러 가지 설계대안을 비교·검토하여 최적설계를 찾아낼 수도 있다.

3. 수문모형의 구분

수문모형의 분류에 대한 명확한 기준은 없는 실정이며, 수문학자에 따라 다양하게 분류하고 있다. 모의과정, 공간 및 시간규모, 해결기법에 의해 분류하기도 하는데, 모의과정에 따라 총괄형 모형(lumped)과 분포형 모형(distributed)으로 구분되고, 이는 다시 확정론적 모형(deterministic)과 추계학적 모형(stochastic)으로 구분되며, 적용하는 공간 및 시간에 따라 연속형 모형(continuous)과 사상형(events) 모형으로, 해석방법에 따라 수치모형과 아날로그 모형 등으로 구분하기도 한다(Singh, 1995).

한편, 원형의 물리적 특성의 반영정도에 따라 물리적 모형(physical)과 추상적(abstract) 모형으로 구분하기도 하는데, 물리적 모형은 다시 축적모형, 모의모형(simulation) 등으로, 추상적 모형은 결정론적 모형과 비결정론적 모형으로 구분하기도 한다(박성우, 1985). 또한 모형의 사용목적에 따라 1) 계획모형(planning), 2) 관리모형(managemnet), 3) 예측모형(prediction)으로 구분하기도 한다(Singh, 1995).

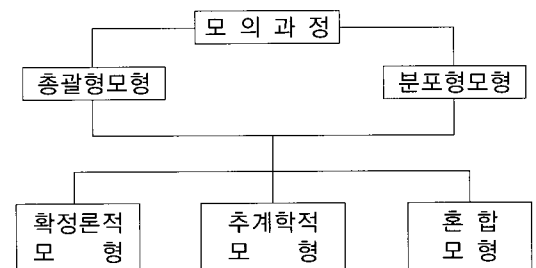


그림 2. 모의과정에 따른 수문모형의 분류 (Singh, 1995)

가. 총괄형 모형과 분포형 모형

총괄형 모형과 분포형 모형은 유역특성의 표시방법에 따라 구분되는데 총괄형 모형은 유역을 하나의 시스템으로 가정하여 입력(강우)과 출력(유출)의 관계를 해석하는 방법이며, 분포형 모형은 유역을 일정한 수의 동질의 요소로 세분하고 그 각각 요소의 수문특성을 해석함으로써 전유역의 수문특성을 계량화하는 방법이다.

실무적으로 많이 적용하고 있는 총괄형 모형으로는 HEC-1, SSARR, TANK 모형 등이 있으며, 분포형 모형으로는 SWMM, NWSRFS 모형 등이 있고, 농업토목분야의 설계실무에서 많이 사용되고 있는 DIROM 모형과 DWAST 모형 등의 장기유출모형과 FAS 모형 등의 단기유출모형도 총괄형 모형의 범주에 속한다.

나. 확정론적 모형과 추계학적 모형

확정론적 모형은 수문사상이 입력-출력관계를 유지하면서 확정적인 법칙에 따라 발생하는 것으로 보는 모형이며, 확정론적 법칙은 주로 경험적인 공식을 사용하게 된다. 대부분 실무적으로 적용하고 있는 모형은 확정론적 모형이 많으며, 앞서 언급한 HEC-1, SSARR, DIROM, DWAST 모형 등은 모두 확정론적 모형으로 분류된다.

추계학적 모형은 실제의 수문사상에 관계없이 어떤 유역에서 실측된 수문시계열의 확률통계학적 거동을 재현시킴으로써 장래에 발생할 수문사상을 예측하며, 수문사상의 발생순서를 고려하여 생기확률을 분석하는 모형으로, 관측 기간이 짧은 수문자료를 관측기록의 통계학적 특성을 유지하면서 장기적인 자료를 인위적으로 발생시킬 수 있는 확률통계학적 방법이다.

다. 연속형 모형과 사상형 모형

모형에 사용된 입력자료와 계산간격뿐만 아

니라 모형의 출력과 보정의 시간간격에 따라 사상모형(event based), 연속모형(continuous time)으로 구분하기도 하는데, 연속형 모형은 주로 장기유출량을 산정하는데 적용되며, 사상모형은 홍수유출량을 산정하게 된다.

실무적으로 적용하고 있는 연속적인 강우사상을 모의하는 장기유출모형으로는 TANK, SSARR, DIROM, DWAST 모형 등이 있으며, 과거에 실무적으로 많이 사용하였던 가지야마 유출량 공식, 저류함수법 등도 이 부류에 속한다. 단일 호우사상에 대한 유출모형으로는 HEC-1, FAS, TR-55 모형과 RRL 방법, ILLUDAS 모형 등이 있다.

4. 수문모형의 적용

유역특성에 맞는 수문모형이 선정되었으면 모형의 적용성 및 정확성을 평가하기 위하여 모형의 보정 및 검정과정이 필요하다. 이러한 과정은 모형의 매개변수를 최적화하는 과정이며 실제 수문유역의 현상을 가장 근사하게 모의하기 위한 과정이다. 수문모형을 실제 유역에 적용하기 위한 일반적인 과정을 살펴보면 다음과 같다.

가. 수문모형의 선정

수자원개발의 계획·설계·운영에 대한 정량적인 정보를 제공해 주고, 수자원관리에 대한 의사결정을 최적화하는 데 이용할 수 있는 수문모형은 기 개발된 모형을 이용할 수도 있고, 분석 목적에 맞는 새로운 모형을 개발하여 적용할 수도 있다.

그러나 유역의 유출을 지배하는 물리적 법칙이 아주 복잡하고 추정 매개변수가 시간 및 공간에 대하여 가변적일 뿐 만 아니라 신뢰할 만한 수문자료를 획득하는 것이 쉽지 않으므로 새로운 수문모형을 개발한다는 것은 어려운 일이다. 그러므로 특정 유역의 유출특성을 반영

할 수 있고, 포괄적이며 대중성 있는 모형을 이용하는 경우가 많다. 기존 수문모형을 이용할 경우에는 분석 목적에 맞는 모형을 선택하되 모형예측의 정확도, 모형의 단순화정도, 매개변수의 수 및 일관성, 이용가능한 자료 및 시간 등을 고려하여 모형을 선택하여야 한다.

나. 모형의 보정

모형의 보정은 모형으로부터의 결과가 관측 기록자료에 일치되도록 모형의 매개변수를 계속하여 수정하여 그 값을 결정하는 과정을 말한다. 이 과정을 통하여 추정된 매개변수값이 유역의 특성과 일관성을 갖게 된다.

일반적으로 모형의 보정은 매개변수를 비교적 독립적인 특성을 가진 소그룹으로 분할하여

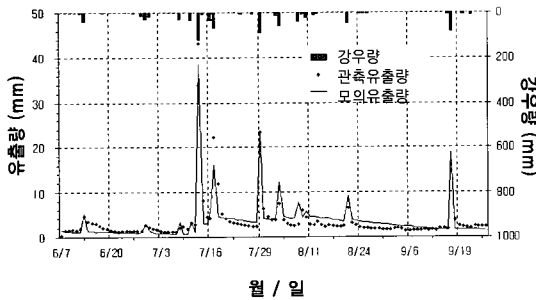


그림 3. 수문모형의 보정결과 예시(장중석, 1999)

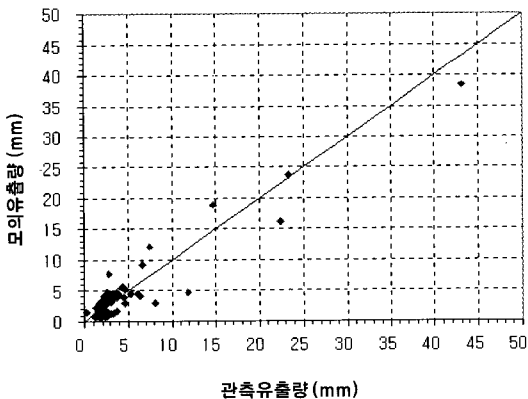


그림 4. 수문모형의 보정에 따른 분산도 예시 (장중석, 1999)

각 그룹에서 주요한 매개변수를 선정하여 보정하게 되며, 오차가 크지 않은 매개변수 값을 상수로 하여 오차범위가 큰 매개변수를 오차범위가 작은 값으로 변동해가며, 모든 매개변수의 오차가 더 이상 감소하지 않을 때까지 보정하게 된다(박성우, 1995).

수문모형의 보정은 수문사상이 많을수록 용이하며, 장기유출의 경우 유역에서 홍수 및 평·갈수 유출량을 전부 반영할 수 있는 여러 사상이 충분히 포함되어야 한다. 장기 유출을 모의하는 수문 모형의 보정결과를 예시하면 그림. 3~4와 같다.

다. 모형의 검정

모형의 보정을 통하여 수문모형의 매개변수 값이 결정되면 모형의 결과가 실제 수문유역의 특성을 대표하는지 여부를 평가하는 절차가 필요하며 이를 모형의 검정이라고 한다. 모형의 검정을 통하여 보정 매개변수에 의한 수문량 추정치를 수용할 수 있는지 여부를 결정하게 된다.

모형의 검정시에는 보정에 사용한 것과 동일

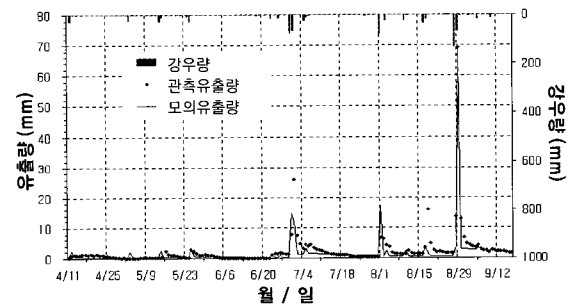


그림 5. 수문모형의 검정결과 예시(장중석, 1999)

한 자료를 사용하지 않아야 하며, 일반적으로 모형의 보정 및 검정에 오차가 발생하는 원인으로서는 보정에 사용된 자료의 오차, 중요한 매개변수의 보정에 필요한 수문사상이 포함되지 않은 기록치 사용 등이 있다. 수문모형의 검정

결과를 예시 하면 Fig. 5와 같다.

라. 민감도 분석

수문모형을 이용하여 수문량을 계산할 경우 신뢰도 문제가 발생하며 일반적으로 수문모형에서 불확실성이 발생하는 요인으로는 자연적인 것, 수문자료에 포함된 것, 모형의 매개변수에 포함된 것, 모형의 구조에 관한 것 등으로 나눈다. 이중 매개변수에 관한 것으로는 일반적인 개념을 벗어난 매개변수의 적용 등이며 보통 매개변수의 민감도(sensitivity)를 분석함으로써 평가한다.

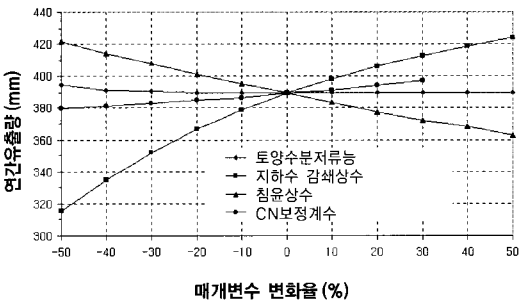


그림 6. 수문모형의 매개변수 민감도 분석결과 예시 (장중석, 1999)

매개변수의 민감도 분석을 실시함으로써 보정된 매개변수가 모형의 거동에 미치는 영향을 검토하고, 매개변수의 특성을 파악할 수 있게 된다. 민감도 분석결과 특정 매개변수에 의한 수문량이 상식적인 범위를 벗어나거나 너무 민감하게 반응할 경우 모형의 적용성을 다시 검토하여야 한다. 수문모형의 매개변수 민감도 분석결과를 예시하면 그림. 6과 같다.

5. 매개변수의 이해

수학적으로 매개변수란 몇 개의 변수 사이에 함수관계를 정하기 위해서 사용되는 또 다른

하나의 변수를 말하며 파라미터(parameter)라고도 한다. 수문모형에서도 이와 마찬가지로 수문 모형을 하나의 함수로 가정한다면 수문모형의 기작을 나타내는 몇 개의 변수 사이에 함수 관계를 정의하기 위하여 매개변수가 필요하게 되며 수문모형의 적용 효율성 및 신뢰성은 이 매개변수가 실제로 현실사상을 얼마나 반영하고 있는지로 평가할 수 있다.

가. 매개변수의 추정

수문모형의 보정과 검정과정은 곧 매개변수의 추정과정을 의미하며 모형으로부터의 계산된 값과 실측치가 가장 잘 일치되도록 초기조건 및 매개변수를 유역의 조건에 맞게 조정해 가는 과정이다. 일반적인 매개변수의 보정은 시행착오법을 이용한 수동보정 방법과 최적화 기법을 이용한 자동보정 방법으로 나누게 된다.

시행착오법을 이용한 수동보정은 모형의 매개변수를 계속적으로 변화시켜 추정치를 실측치와 비교하는 것으로 전문가의 경험이나 판단에 의존하는 방법이며, 유역조건에 맞는 안정적인 해를 구할 수 있으나 시간이 많이 소요되며 동일한 유역에 대하여 서로 다른 결과를 얻을 수 있는 단점이 있다. 보통 모형의 매개변수를 변화시켜가면서 도식적 일치(eye fitting), RMSE(Root Mean Square Error), 상관계수 r이 만족할 만한 결과를 얻을 때까지 모형을 반복 실행하여 최적의 매개변수를 선택하게 된다.

자동보정은 모형의 추정결과를 평가하기 위하여 목적함수를 최대 또는 최소화하도록 최적화 기법을 이용하여 매개변수를 추정하는 방법이다. 컴퓨터 이용을 전제로 하는 수문모형의 자동보정은 보정과정을 신속하게 할 필요성과 모형예측의 객관성과 신뢰성을 얻기 위한 수단으로 사용된다. 개략적인 매개변수 추정절차를 나타내면 그림. 7과 같다.

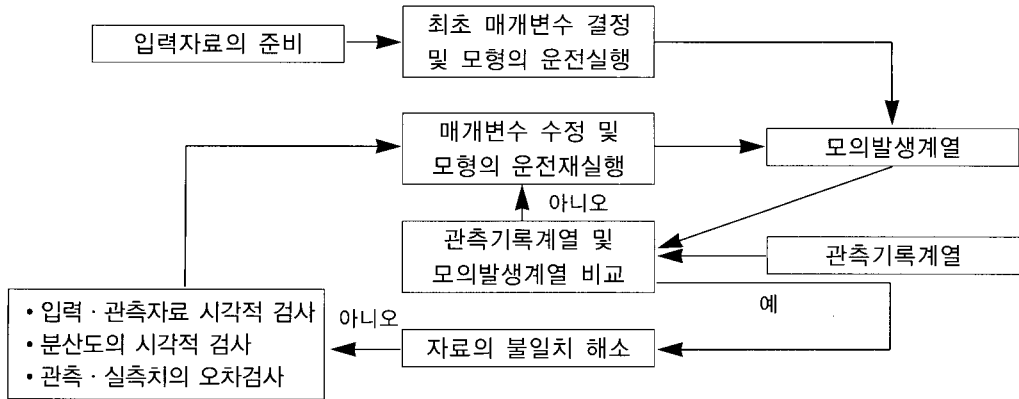


그림 7. 수문모형의 개략적인 매개변수 추정절차 (박성우, 1995)

나. DIROM 모형의 매개변수

DIROM 모형은 농업용 저수지의 일별 유입량을 모의발생하기 위하여 Sugawara의 TANK 모형을 우리나라 관개용 저수지의 유역 특성에 맞게 수정한 것으로서 3단 TANK를 직렬로 연결하여 유역의 지표유출, 중간유출, 기저유출을 각 성분별로 재현할 수 있도록 개념화 한 것이다.

이와 같은 DIROM 모형은 실측 유출량자료를 이용하여 모형을 보정하여야만 사용할 수 있는 매개변수를 유역면적, 토지이용별 면적

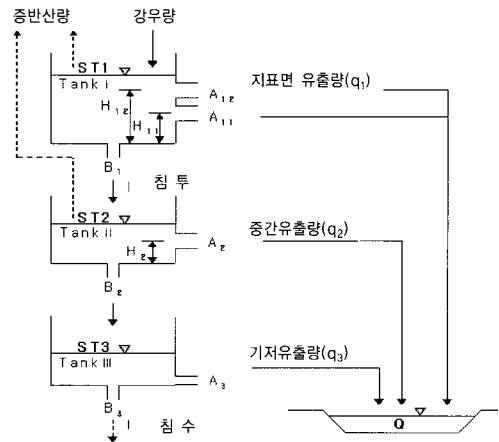


그림 8. DIROM 모형의 개념도 (김현영, 1987)

표 1. DIROM 모형의 주요 매개변수 및 회귀식

구 분	매개변수	내 용	회 귀 식
Tank I	A11	유출공의 크기(1)	$-0.00414 * padd + 0.169$
	A12	유출공의 크기(2)	$-0.00175 * forst + 0.333$
	H11	유출공의 높이(1)	5.00
	H12	유출공의 높이(2)	$16.68 * \text{Log}(wsa) + 24.2$
	B1	침투공 크기	$-0.07 * \text{Log}(wsa) + 0.47$
	ST1	저류수심	0.00
Tank II	A21	유출공의 크기	$0.00657 * uplan + 0.163$
	H21	유출공의 높이	$\text{EXP}(-0.0934 * uplan + 2.0904)$
	B2	침투공의 크기	$0.00998 * padd + 0.111$
	ST2	저류수심	0.00
Tank III	A31	유출공의 크기	$-0.000267 * uplan + 0.00912$
	H31	유출공의 높이	0.00
	B3	침투공의 크기	$-0.00618 * \text{Log}(wsa) + 0.0351$
	ST3	저류수심	$43.686 * \text{Log}(wsa) + 37.159$

* wsa : 유역면적, uplan : 발면적 비율, padd : 논 면적비율, forst : 산림면적 비율

등에 의한 회귀식을 유도하여 무계측유역에서 사용할 수 있도록 한 것이다. DIROM 모형의 주요 매개변수는 각 탱크의 저류수심(ST1, ST2, ST3), 유출공의 크기(A11, A12, A11, A12)와 유출공의 높이(H11, H22, H2, H3), 침투공의 크기(B1, B2, B3) 등이 있으며, 유역 증발산 자료도 중요한 매개변수 중의 하나이며 각 매개변수는 유역면적, 논, 밭, 산림면적의 유역면적 비율에 대한 회귀식으로 정의된다. DIROM 모형의 구조도 및 매개변수 일반현황을 나타내면 그림 8 및 표 1과 같다.

다. HEC-1 모형의 매개변수

HEC-1 모형은 1967년 HEC(Hydrologic Engineering Center)에서 개발되기 시작하였으며, 유역과 하도에서의 유출해석, 댐의 안전도와 파괴분석, 홍수피해 분석 및 홍수조절 시스템 설계 등 실무에서 홍수유출해석에 광범위하게 적용되고 있는 단기 유출모형으로 하천 유역에 대한 흐름망(stream network) 모형을 구성하여 임의지점의 홍수수문곡선을 산정할 수 있다.

HEC-1 모형에서 채택하고 있는 유출해석 방법은 크게 단위도 방법과 운동과 방법으로 구분할 수 있으며, 유역의 유출과정을 지표면 유출과 하천 수로에서의 홍수파의 이동을 표현하는 하도추적으로 개념화하고 있다. HEC-1 모형의 하천유역 흐름망을 이용한 유출모의 과

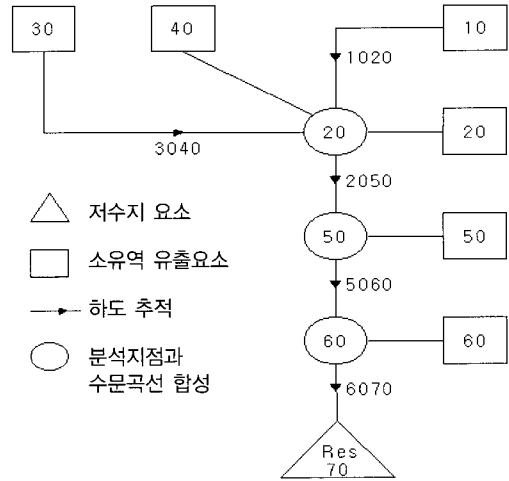


그림 9. HEC-1 모형의 하천유역 흐름망 모형 개념도

정을 나타내면 그림 9와 같다.

HEC-1 모형에는 적용이론에 따라 다양한 매개변수를 필요로 하고 있으나 일반적으로 차단과 침투, 지표면 유출, 기저유출, 하도 홍수 추적을 위한 매개변수를 필요로 한다. 실무에서 많이 사용하고 있는 SCS 단위도와 Muskingum 하도추적법에 의한 유역의 유출량을 산정할 경우 주요 매개변수를 간단히 살펴보면 표 2와 같다.

유출관련 매개변수로는 유역의 지체시간(TLAG)이 있고, 기저유출 관련 매개변수로는 유출곡선상에서 기저유출의 효과를 고려하는 하천에서의 초기유량(SRTTQ), 수문곡선의 감수부에서 지수함수적으로 감소하는 시점의 유

표 2. HEC-1 모형의 주요 매개변수 (SCS 단위도 및 Muskingum 방법 적용시)

구분	매개변수	매개변수 설명
단위유량도	TLAG	SCS 지체시간(h)(유효강우 우량도의 무게중심에서 단위도의 첨두유량 발생시간까지의 시간)
기저유출	SRTTQ QRCSN RTIOR	유출지점 하천에서의 초기 유량 수문곡선의 감수부에서 지수함수적으로 감소하는 시점의 유량 감수부에서의 임의유량과 1시간 후의 유량과의 비
하도추적	AMSKK X NSTPS	추적구간에서의 홍수의 도달시간(K, h) Muskingum의 가중계수 Muskingum 추적을 위한 하천구간의 분할 갯수

량(QRCSN) 및 감수부에서의 임의유량과 1시간 후의 유량과의 비(RTIOR) 등이 있다. 한편, Muskingum 방법을 적용할 경우 하도추적(routing)과 관련된 매개변수는 추적구간에서의 홍수의 유달시간(K, h)과 Muskingum의 가중계수(X, $0.0 \leq X \leq 0.5$), 하도구간의 분할 갯수(NSTPS) 등이 있다.

6. 맺는말

지금까지 살펴본 바와 같이 수문모형은 물의 순환과정을 이해하고, 이·치수, 환경목적으로 물을 다루는데 있어 유용하게 사용되고 있는 것이 현실이다. 더욱이 지리정보시스템(GIS)을 이용한 분포형 수문모형의 발달로 수문모형은 보다 세밀해지고 다양한 모의 기법을 가지게 되었으며, 보다 많은 분야에 적용되고 있다.

그러나 수문모형은 자료의 불확실성, 매개변수의 불확실성 및 모형 구조의 불확실성 등으로 인하여 비전문가가 적용할 경우 모형에 의한 출력결과에 대하여 정확성 및 신뢰성을 담보할 수 없다. 그러므로 수문모형을 이용하여 수자원의 계획·설계·운영방안을 모색하기 위해서는 수문 모형을 보다 잘 이해해야 하고, 또한 좋은 결과를 얻기 위해서는 수문모형의 개념과 수문모형의 신뢰성 및 정확성을 좌우하는 매개변수에 대한 이해의 폭을 넓혀야 할 것이다.

참고문헌

1. 김현영, 1987, 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의발생, 서울대학교 박사학위 논문, p. 19.
2. 김현준, 2001, 2매개변수 쌍곡선형 일유출모형의 개발, 서울대학교 박사학위논문, p. 1.
3. 박성우외, 1995, 응용수문학, 향문사.
4. 박승우, 1985, 모형해석의 이론과 응용 - 기본개념과 물리적 모형 -, 한국농공학회지, 27(3), p. 29.
5. 윤용남, 1996, 공업수문학, 청문각.
6. 장중식, 1999, 오염부하량 산정을 위한 GWLF 모형의 적용, 한경대학교 석사학위 논문, pp. 50-53.
7. 한국건설기술연구원, 1995, HEC-1 홍수수문곡선 해석 프로그램 사용자 설명서, pp. 21-39.
8. Singh, V.P., 1995, Computer Models of Watershed Hydrology - Watershed Modeling, pp. 1-19.
9. Sorooshian, S. and Gupta, V.K., 1995, Computer Models of Watershed Hydrology - Model Calibration, pp. 23-63.