유역 및 기상상태를 고려한 Clark 단위도의 매개변수 평가

Evaluation of the Clark Unit Hydrograph Parameters Depending on Basin and Meteorological Condition

유철상* / 이지호 / 김기욱*****

Yoo, Chul sang / Lee, Ji ho / Kim, Ki wook

요 지

본 연구에서는 관측자료에 나타난 Clark 단위도의 매개변수를 검토하고 그 변동성을 평가하였다. 강우-유출과정에 영향을 미치는 유역 및 기상 특성인자들을 확률밀도함수로 정량화하였고, 유역의 집중시간 및 저류상수를 호우사상의 특성 및 유역의 조건을 고려하여 다변량 회귀분석을 실시하였다. 이를 Monte Carlo 모의기법에 적용하여 유역평균 저류상수 및 집중시간에 대한 신뢰구간을 추정하였다. 또한 신뢰구간을 좁히기 위한 방안으로 관측된 집중시간 및 저류상수를 Bootstrap 기법으로 처리하였다. 그 결과 유역을 대표하는 유출특성의 결정에는 관측 강우-유출사상의 수가 어느 정도 확보된다고 하더라도 여전히 높은 불확실성을 피하기 힘들다는 것이다. 집중시간의 경우는 그 분포가 상당히 왜곡된 형태여서 단순한 산술평균은 상당히 왜곡된 추정치를 제시할 가능성이 높다. 단순히 관측치를 이용한 경우보다 Monte Carlo 모의기법에 의한 경우 신뢰구간이 2-3배정도 좁게 나타났다. 어느 정도 신뢰도 있는 집중시간 및 저류상수의 추정을 위해서는 최소 10여개 대략 20개 정도 이상의 호우사상이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구의 목적은 주어진 유역을 대표할 수 있는 집중시간 및 저류상수를 결정하고자 하는 것이다. 따라서 본 연구에서의 방법론을 적용하여 관측자료가 존재하는 다양한 유역에서의 집중시간 및 저류상수를 결정하고, 이를 지형인자 유역특성을 고려하여 회귀분석하는 경우 보다 정도 있는 경험식의 개발도 가능할 것이다.

핵심용어 : Clark 단위도법, 유역의 대표성, 집중시간 및 저류상수, 확률밀도함수, 다변량 회귀분석, Monte Carlo 모의기법, Bootstrap

1. 서론

강우-유출 해석은 수공구조물의 설계, 수자원의 관리 등 다양한 목적에 필수적이다. 특히, 강우-유출과정의 비선형성(non-linearity) 및 복잡성(complexity)으로 인해 그 특성을 파악하는 것은 단순한 일이 아니며, 따라서 보다 신뢰도 있는 장기간의 강우-유출 기록이 필수적이다. 그렇지 못

* 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수
Pfor., Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea, envchul@korea.ac.kr

** 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea, kjihito@hanmail.net

*** 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사수료
Doctoral Student, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea, k_w_kim@hotmail.com

한 경우 해석결과의 불확실성이 급격히 커질 수밖에 없다. 우리나라의 경우에는 관측자료 자체의 신뢰성 문제뿐만 아니라 자료관측의 기간도 짧은 문제점이 있는 것이 사실이며, 따라서 수공구조물의 설계 등 강우-유출해석이 관련된 많은 부분에서 다양한 불활실성이 제기되는 것은 어쩔 수 없는 일이기도 하다. 따라서 Clark의 매개변수 추정 시 주관적인 판단이 개입되어 분석자마다 일치되지 않은 해석을 하는 등 높은 불확실성을 내포하고 있는 것이 사실이다(성기원, 2003). 현재까지는 대부분 관측 강우-유출 기록을 분석하여 추정한 집중시간 및 저류상수를 산술평균한 값을 유역의 대표값으로 결정했으나, 이는 충분히 많은 수의 강우-유출 사상이 가용한 경우에 한해 유효하다. 따라서 주어진 유역에서 매개변수가 유역 및 기상상태에 따라 어떻게 변하는지 먼저 파악할 필요가 있다.

본 논문에서는 강우-유출과정에 영향을 미치는 유역 및 기상 특성인자들을 확률밀도함수를 적용하여 정량화하였고, 평균적인 특성의 강우-유출 사상을 선정하였으며, 이들 사상을 이용하여 강우-유출과정의 평균적인 특성 및 그 불확실성을 추정하였다. 또한 신뢰구간을 좁힐 수 있는 방안으로는, 집중시간 및 도달시간을 강우, 기상, 및 유역 특성인자로 다변량 회귀분석하여 이를 Monte Carlo 모의기법을 통하여 분석하는 방안과 관측된 집중시간 및 저류상수를 Bootstrap 기법으로 처리하여 분석하는 방안 등을 비교·평가해 보았다.

2. 대상유역

본 연구에서는 IHP 대표 유역인 평창강 방림지점을 대상으로 연구를 수행하였다. 평창강 유역은 남한강수계, 충주호 상류유역의 서강으로 합류되는 주천강, 평창강 유역으로, 강원도 영월군 평창군에 위치하고 있으며, 총 11개의 우량관측소와 6개의 수위관측소가 위치하고 있다(건설교통부, 2004). 본 연구에서는 1983 - 2003년 사이의 강우사상 중 분석이 가능한 것으로 판단된 56개 사상을 선정하여 이용하였다.

3. 대표 호우사상의 선정 및 분석

3.1 강우, 기상 및 유역특성의 정량화

본 연구에서는 Clark의 매개변수인 집중시간(T_c)과 저류상수(K), 강우지속시간(R_D), 총강우(R_T), 최대강우강도(R_{MI}), 평균 강우강도(R_{AI}), 선행5일강우(P_5), 온도(T), 풍속(W), 풍향(D), 운량(C), 일조시간(S), 식생상태(J_D)를 정량화 하였다. 위 인자들 중 평균운량, 일조시간 등과 같이 상하 한계가 뚜렷한 경우는 beta 분포를 평균기온의 경우는 정규분포를, 평균풍향이나 식생의 경우는 방향성이 있는 자료의 특성화에 가장 많이 이용되는 von Mises 분포를 이용하였다(Fisher, 1995). 그 결과 집중시간의 경우는 그 분포가 상당히 왜곡된 형태여서 단순한 산술평균이 상당히 왜곡된 추정치를 보였고, 오히려 최빈값의 경우가 보다 대표성을 갖는 것으로 판단된다. 반면에 저류상수의 경우는 거의 대칭인 분포를 하고 있으므로 산술평균이 어느 정도의 대표성을 확보한다고 판단할 수 있다.

3.2. 평균적인 유역 및 기상상태에서의 저류상수 및 집중시간 검토

본 연구의 경우 고려한 총 57개의 강우-유출사상 중 95% 신뢰수준을 만족하는 사상은 총

21개, 90% 신뢰수준을 만족하는 사상은 총 12개, 85% 신뢰수준을 만족하는 사상은 총 6개로 파악되었다. 다음 Fig 1.은 3가지 신뢰수준에 의해 유도되는 Clark 단위도이다.

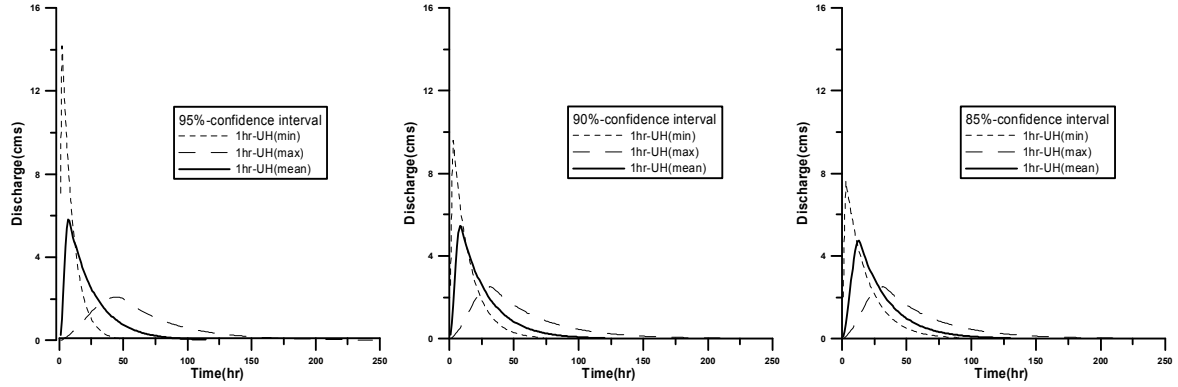

Fig. 1. One-hour UH derived using mean, maximum and minimum concentration times and storage coefficients for given significance levels of 95%, 90% and 85%

4.매개변수의 변동성 추정

4.1. 유역 및 기상특성과 유출특성의 회귀분석

비선형 회귀식을 가정하였고, 이 모형의 양변에 대수(log)를 취하여 선형화한 후 선형회귀분석을 수행하는 방식을 취하였다. 다중공선성을 제거 후 회귀분석한 결과 집중시간의 경우 단계식 선택방법(C_p가 가장 작은 경우)의 경우 2변수 모형이였고 저류상수의 경우는 4변수 모형으로 파악되었다. 반면에 모형의 독립변수 개수(p)와 맬로우의 C_p값이 거의 같은 경우는 집중시간 T_c 및 저류상수 K 모두 변수가 8개인 경우로 파악되었다. 먼저 단계식 선택방법의 경우(C_p가 가장 작은 경우)에 집중시간과 저류상수의 회귀식은 각각 다음과 같고 이때 결정계수는 각각 0.254, 0.404로 나타났다.

$$T_c = 737.87 R_T^{-0.719} R_{MI}^{-0.759} \tag{1}$$

$$K = 202.924 R_T^{-0.341} R_{MI}^{-0.271} W^{-0.147} \{(\cos(J_D - 15)*360/365) + 1\}^{0.044} \tag{2}$$

또한 맬로우의 C_p가 독립변수의 개수 p와 가장 유사한 경우에 대한 집중시간과 저류상수의 회귀식은 다음과 같고 이때 각각의 결정계수는 0.302, 0.438로 나타났다.

$$T_c = 1.166 R_T^{-0.710} R_{MI}^{-1.065} (P_5/175 + 0.1)^{0.033} T^{1.435} W^{-0.219} C^{1.487} (S/8.6 + 0.1)^{0.107} \{(\cos((J_D - 15)*360/365) + 1\}^{0.077} \tag{3}$$

$$K = 121.114 R_T^{-0.372} R_{MI}^{-0.190} (P_5/175 + 0.1)^{-0.060} T^{-0.350} W^{-0.185} C^{0.684} (S/8.6 + 0.1)^{0.079} \{(\cos((J_D - 15)*360/365) + 1\}^{0.031} \tag{4}$$

4.2. 유역의 저류상수 및 집중시간의 신뢰구간 추정

Monte Carlo 모의기법이란 입력변수에 대한 반복적인 통계학적 샘플링을 통해 다양한 수학

적 문제들에 대한 근사해를 얻어내는 방법이다(Fishman, 1996). Monte Carlo 모의기법은 이미 알고 있는 확률분포로부터 많은 양의 자료를 생성하거나 복합적인 수자원시스템의 확률적 거동을 연구하는데 많이 사용되고 있다(Haan, 1979). 본 절에서는 전장에서 구한 회귀식을 Monte Carlo 모의기법에 적용하여 유역의 집중시간과 저류상수 및 그 신뢰구간을 추정하였고 신뢰구간은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Comparison of observed concentration time T_c and storage coefficient K with those estimated by the Monte Carlo simulation

Parameter	C.I.	Methodology		Lower Limit	Mean		Upper Limit
					$\exp(\mu_{\log})$	μ	
T_c (hr)	95%	Monte Carlo	1	1.6	5.0	5.9	15.0
			2	1.2	5.1	6.9	22.4
		Observed		1.2	6.8	11.6	50.0
	90%	Monte Carlo	1	2.0	5.0	5.9	12.5
			2	1.5	5.1	6.9	17.6
		Observed		2.0	8.0	11.5	33.5
	85%	Monte Carlo	1	2.2	5.0	5.9	11.2
			2	1.7	5.1	6.9	15.1
		Observed		2.0	12.9	12.3	33.5
K (hr)	95%	Monte Carlo	1	11.5	19.7	20.4	33.6
			2	11.0	19.6	20.5	34.9
		Observed		8.7	20.7	22.6	41.0
	90%	Monte Carlo	1	12.5	19.7	20.4	30.8
			2	12.1	19.6	20.5	31.8
		Observed		13.5	21.7	22.9	39.2
	85%	Monte Carlo	1	13.3	19.7	20.4	29.1
			2	12.8	19.6	20.5	29.9
		Observed		17.4	23.2	23.8	39.2

위의 표를 보면 Monte Carlo 모의기법을 이용하여 얻은 집중시간과 저류상수의 범위가 평균적인 강우사상을 선정하여 얻을 결과보다 더 좁게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 Monte Carlo 모의기법의 결과를 이용하는 경우 단순히 관측자료의 통계치를 이용하는 경우에 비해 보다 엄격한 신뢰구간을 제공해 준다는 의미가 된다. 즉, 단순히 관측치를 이용한 경우보다 Monte Carlo 모의기법에 의한 결과의 신뢰구간이 2-3배정도 좁게 나타나는 것을 파악할 수 있다.

4.3. 한정된 관측자료로부터 추정된 유역의 저류상수 및 집중시간의 한계 분석

Efron(1979)에 의해 처음 소개된 Bootstrap 기법은 통계적 추론의 한 분야인 추정에 있어서 추정량의 편의(bias)와 표준오차(standard error)를 줄이고, 모수의 분포를 확실히 할 수 없을 때 주어진 자료로부터 그 분포를 추정하는 통계적 기법이다. 본 연구에서 사용된 총 56개의 호우사상을 1, 10, 20, 30, 40, 50 및 56개를 1000회 무작위로 선택하고 각 호우사상에 대해 추정한 매개변수를 평균하여 유역의 대표값으로 사용하는 경우의 불확실성을 판단하였다. 호우사상의 수가 10이상일 경우 어느 정도 유의한 집중시간 및 저류상수를 추정할 수 있으며, 20 이상일 경우 그 신뢰도는 매우 높아진다는 것을 확인할 수 있다. 물론 다양한 호우사상을 사용한다는 경우에 해당하는 결론이다. 이 결과를 그림으로 나타내면 Fig. 2와 같다.

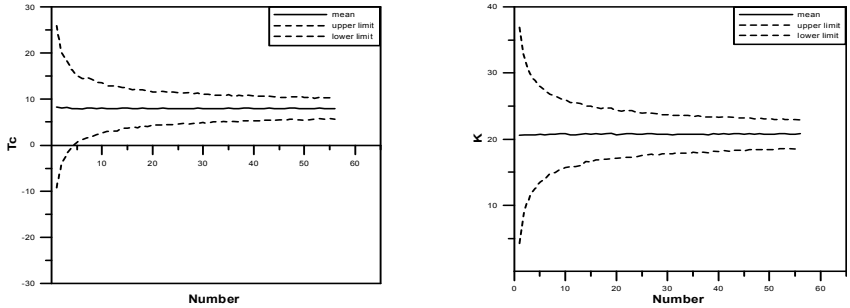

Fig. 2. Change of confidence interval of T_c and K depending on the number of samples (95% significance level)

5. 결론

본 연구에서는 Clark 단위도법의 매개변수 추정방법을 검토하고 강우-유출과정에 영향을 미치는 유역 및 기상 특성인자들을 확률밀도함수를 적용하여 정량화하였다. 이를 바탕으로 하여 관측 강우-유출 사상 중 평균적인 사상을 분류하였다. 선별된 평균 강우-유출 사상을 이용하여 강우-유출과정의 평균적인 특성을 유도하였고, 아울러 그 변동성 또는 불확실성의 정도를 제시하였다. 또한 신뢰구간을 좁힐 수 있는 방안으로 관측된 집중시간 및 저류상수를 Bootstrap 기법으로 처리하여 분석하는 방안과 강우, 기상, 및 유역 특성인자로 회귀분석하여 이를 Monte Carlo 모의기법을 통하여 분석하는 방안 등을 고려하였다. 그 결과 (1) 유역을 대표하는 유출특성의 결정에는 관측 강우-유출사상의 수가 어느 정도 확보된다고 하더라도 여전히 높은 불확실성을 피하기 힘들다. (2) 집중시간 추정에는 대수정규분포의 가정이, 저류상수의 추정에는 정규분포의 가정이 가능할 것으로 판단된다. (3)Monte Carlo 모의기법을 적용하여 추정된 집중시간 및 저류상수의 신뢰도 평가가 가능하다. (4) Bootstrap을 통한 관측자료의 분석에서도 위의 결과를 지지하는 결론을 얻을 수 있었다. 아울러, 어느 정도 신뢰도 있는 집중시간 및 저류상수의 추정을 위해서는 최소 10여개 대략 20개 정도 이상의 호우사상이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구의 목적은 궁극적으로 주어진 유역을 대표할 수 있는 집중시간 및 저류상수를 결정하고자 하는 것이다. 따라서 본 연구에서의 방법론을 적용하여 관측자료가 존재하는 다양한 유역에서의 집중시간 및 저류시간을 결정하고, 이를 지형인자 유역특성을 고려하여 회귀분석하는 경우 보다 정도 있는 경험식의 개발도 가능할 것이다.

참 고 문 헌

건설교통부(2004). **2003년 국제수문개발계획(IHP)**.

성기원(2003). “Gamma 분포형 함수 적합을 이용한 Clark 모형의 매개변수 간접추정.”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제2호, pp. 223-235.

Efron, B. (1979). “Bootstrap methods : another look at the jacknife." *Journal of Statistics*, Vol. 7, pp. 1-26.

Fishman, G.S. (1996). Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications, Springer, pp 1-4.

Haan, C.T. (1979). Statistical Methods of Hydrology, The Iowa State University Press, pp 271-273.