

유역 및 기상상태를 고려한 Clark 단위도의 매개변수 평가:

1. 대표 호우사상의 선정 및 분석

Evaluation of the Clark Unit Hydrograph Parameters Considering Basin and Meteorological Conditions:

1. Selection and Analysis of Representative Storm Events

유철상* / 김기욱** / 이지호***

Yoo, Chulsang / Kim, Kee Wook / Lee, Ji Ho

Abstract

This study evaluated the parameters of Clark unit hydrograph (UH) estimated using the rainfall-runoff measurements and evaluated their variability. This also includes the quantification of basin and meteorological factors using probability density functions, selection of storm events with mean affecting factors, and derivation of average parameters of the Clark UH from storm events selected. Summarizing the results from this procedure are as follows. (1) It is not easy to avoid much uncertainty on the decision of runoff characteristics (that is, the concentration time and storage coefficient) even with some rainfall-runoff events are available. (2) As the distribution function of concentration time is very skewed, a simple arithmetic mean may lead a biased estimate. That is, the arithmetic mean based on the normal distribution can not be representative anymore. The mode may well be the representative in this case. On the other hand, the storage coefficient shows a symmetric distribution function, so the arithmetic mean may be used use for its representative. For the basin in this study, the concentration time in this study is estimated to be about 7 hours, and the storage coefficient about 22 hours.

keywords : Clark unit hydrograph, concentration time, storage coefficient, probability density function

요 지

본 연구에서는 관측자료에 나타난 Clark 단위도의 매개변수를 검토하고 그 변동성을 평가하였다. 여기에는 강우-유출과정에 영향을 미치는 유역 및 기상 특성인자들을 확률밀도함수를 적용하여 정량화하고, 이를 바탕으로 하여 관측 강우-유출 사상 중 평균적인 사상을 분류하며, 마지막으로 선별된 강우-유출 사상에 대해 Clark 단위도의 평균적인 매개변수를 유도하는 과정이 포함된다. 이러한 과정을 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다. (1) 유역을 대표하는 유출특성(즉, 집중시간 및 저류상수)의 결정에는 관측 강우-유출사상의 수가 어느 정도 확보된다고 하더라도

* 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수

Pfor., Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
(e-mail: envchul@korea.ac.kr)

** 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사수료

Doctoral Student, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
(e-mail: kkw5287@korea.ac.kr)

*** 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
(e-mail: kjihito@korea.ac.kr)

여전히 높은 불확실성을 피하기 힘들다. (2) 집중시간의 경우는 그 분포가 상당히 왜곡된 형태여서 단순한 산술평균은 상당히 왜곡된 추정치를 제시할 가능성이 높다. 즉, 정규분포에 근거한 평균값인 산술평균은 더 이상 집중시간에 대한 대표값의 역할을 하지 못한다. 오히려 최빈값의 경우가 보다 대표성을 갖는 것으로 판단된다. 반면에 저류상수의 경우는 거의 대칭인 분포를 하고 있으므로 산술평균이 어느 정도의 대표성을 확보한다고 판단할 수 있다. 본 연구의 대상유역의 경우 집중시간은 대략 7시간 정도가, 저류상수는 대략 22시간 정도가 적절한 것으로 판단된다.

핵심용어 : Clark 단위도, 집중시간, 저류상수, 확률밀도함수

1. 서 론

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 못한 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 불확실성이 제기되는 것은 어쩔 수 없는 일이기도 하다.

새로운 수공구조물이 계획되는 지점에서는 특히 유출 기록이 없을 가능성이 크다. 이런 경우에 적용되는 일반적인 방법은 유역 내 다른 지점 또는 유사한 다른 유역에서 얻은 성과를 토대로 단위도를 합성하거나 아니면 유역 내 다른 지점에 대해 유출해석하고 이를 대상지점에 대해 전이하여 사용하는 것이다. 특히 전자의 경우에는 합성단위도를 주로 이용하게 되며, 현재 실무에서 사용하는 방법은 중안(Nakayasu)의 종합단위도법, Clark 단위도법, Snyder 합성단위도법, 가지야마 공식, 합리식 등이 있다. 김승 등(1993)에 의하면 미계측에 대한 합성단위도를 유도할 때 가장 많이 쓰이는 방법은 Clark 단위도법(45%), 중안의 종합단위도법(43%)의 순으로 Clark 단위도법이 실무에서 가장 많이 사용되는 방법으로 파악되고 있다.

Clark은 1945년에 유출의 거동을 저류(storage)와 전이(transition)효과로 구분하여 유역출구에 가상의 단일 선형저수지가 존재한다고 가정하고, 등시간도로 구성되는 집중시간-집수면적도의 저수지 추적을 실시하여 순간단위도를 유도하였다. 그러나 Clark 단위도의 매개변수인 집중시간(T_c)과 저류상수(K)를 정확히 추정하는 것은 단순한 일이 아니다. 먼저 미계측 유역에서의 저류상수를 추정하기 위해 유도된 식들은 실무자가 자연

유역에서 결정하기 어려운 수리학적 인자와 지형도에서 추출하기 어려운 지형학적 인자로 유도된 것이 대부분이다(윤태훈과 박진원, 2000). 또한 Clark 모형의 매개변수 추정식들은 대부분 외국에서 개발된 식이어서 우리나라의 지역성을 반영하지 못하고 있다. 현재 국내의 연구도 집중시간-집수면적도의 구성과 저류상수 산정방법의 개선보다는 이들 식에 지역성을 반영하고자 하는 매개변수 추정식의 제시 정도에 머무르고 있는 실정이다(윤석영과 홍일표, 1995). 따라서 매개변수 추정 시 주관적인 판단이 개입되어 분석자마다 일치되지 않은 해석을 하는 등 높은 불확실성을 내포하고 있는 것이 사실이다(성기원, 2003).

보다 근본적으로는 관측자료가 가용한 경우에도 주어진 유역을 대표할 수 있는 집중시간과 저류상수를 결정하는 방안조차 마련되어 있지 않다는 문제가 있다. 현재까지는 대부분 관측 강우-유출 기록을 분석하여 추정된 집중시간 및 저류상수를 산술평균한 값을 유역의 대표값으로 결정했으나, 이는 충분히 많은 수의 강우-유출 사상이 가용한 경우에 한해 유효하다. 그렇지 못할 경우 단순한 산술평균이 왜곡된 추정치를 줄 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 주어진 유역에서 매개변수가 유역 및 기상상태에 따라 어떻게 변하는지 먼저 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 이러한 문제에 초점을 맞추어 주어진 유역에서의 집중시간 및 저류상수의 변동성 또는 불확실성에 대해 살펴보고자 한다. 이들 매개변수에 영향을 미칠 것으로 판단되는 인자들은 크게 강우특성인자, 기상특성인자, 유역특성인자로 구분할 수 있다. 먼저 강우의 특성인자로서 최대 강우강도, 평균 강우강도, 강우 지속시간, 총강우량, 강우의 이동방향, 강우의 이동속도 등을 들 수 있고, 기상특성으로는 평균 기온, 평균 운량, 평균 일조시간, 증발량 등을, 마지막으로 유역의 특성으로는 토양수분의 상태 및 식생 조건 등을 들 수 있다. 이들 인자들은 Clark 단위도의 매개변수인 집중시간과 저류상수, 즉 유출특성인자에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 먼저 Clark 단위도법의 매개변수 추정

방법을 검토하고, 이와 관련된 기존 연구성과를 평가하여 유역을 대표하는 매개변수의 결정과정의 문제점을 제시해 보고자 한다. 다음으로 강우-유출과정에 영향을 미치는 유역 및 기상 특성인자들을 확률밀도함수를 적용하여 정량화하고, 이를 바탕으로 하여 관측 강우-유출 사상 중 평균적인 사상을 분류해 볼 것이다. 선별된 평균 강우-유출 사상을 이용하여 강우-유출과정의 평균적인 특성을 유도하고자 하며, 아울러 그 변동성 또는 불확실성의 정도를 제시해 볼 수 있을 것이다. 만일 그 불확실성을 정량적으로 제시할 수 있다면 관련된 혼란이 상당부분 해소될 수 있을 것이며, 또한 그 대책도 적절한 방향성을 가지고 마련될 수 있을 것이다. 이러한 연구 내용을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

- (가) 대상유역 선정 및 강우-유출자료 수집
- (나) Clark 방법 적용을 통한 호우사상별 집중시간 및 저류상수 추정
- (다) 기상 및 유역 특성의 정량화(확률밀도함수 적용)
- (라) 관측 호우사상에 대한 심층적 분석을 통한 평균적인 특성의 호우사상 선별
- (마) 평균적인 기상 및 유역조건에서 유역의 집중시간 및 저류상수 특성 분석

2. Clark 단위도 및 관련 연구 분석

2.1 Clark 단위도

Clark 단위도법은 집중시간-누가면적관계를 사용하여 자연하천유역에 내리는 순간단위유효우량으로 인한 유역출구에서의 직접유출수문곡선을 유도하는 방법으로 유수의 전이뿐만 아니라 유역의 저류효과도 고려하므로 자연유역에서의 적용에 적합하다(Sabol, 1988; US Army Corps of Engineers, 2000). Clark 단위도법은 국내에서 도시유역 및 자연유역에 널리 적용하여 사용되고 있으며(김승 등, 1993), 이에 관한 자세한 이론적 배경 등은 윤용남(1998) 등에서 자세히 살펴볼 수 있다.

Clark 단위도법의 매개변수는 집중시간과 저류상수가 있다. 집중시간은 수리학적으로 유역의 최원점에 내린 강우가 유역의 출구에 도달하는데 소요되는 시간이고, 저류상수는 유효우량이 유역출구로 빠져나가기 전에 유역에 일시적으로 저류시키는 능력을 시간의 단위로 표현한 것이다.

Clark 단위도의 매개변수 추정은 계측 유역과 미계측 유역으로 구분하여 살펴볼 수 있다. 먼저, 계측유역에서 매개변수를 추정하는 방법은 선형저수지의 저류방정식을 이용하는 방법, 실측수문곡선의 감수곡선부의 유출

량과 저류량의 감소율간의 관계를 이용하는 방법, 수문곡선에서 변곡점 이후의 감수곡선부분을 해석하는 방법 등으로 나눌 수 있다(Sabol, 1988). 반면에 미계측 유역에서 매개변수 추정은 실측 자료가 없으므로 주로 경험식을 이용하여 추정한다. Clark 단위도법의 집중시간을 추정하기 위한 경험공식으로는 Kirpich 공식, Rziha 공식, Kerby 공식, Kraven(I) 공식, Kraven(II) 공식, SCS Lag 공식, SCS 평균유속 공식, Kinematic Wave 공식 등이 있다. 저류상수의 경우는 유역특성과 연관시키기 어려워 집중시간보다 더욱 산정이 어려운 인자로 알려져 있다. 일반적으로 Clark 공식, Linsley 공식, Russel 공식, Sabol 공식과 같은 경험식을 이용하는데, 이들 경험식도 대부분 집중시간을 독립변수로 하는 회귀식들이다(Peters, 1993; 건설교통부, 2005). 매개변수가 결정되면 소위 등유하시간-면적곡선을 이용하여 단위도를 유도하게 되며, 등유하시간-면적곡선이 주어지지 않은 경우에는 일반적인 타원형의 유역 형상으로 가정하여 단위도를 결정하게 된다(US Army Corps of Engineers, 2000).

2.2 국내 관련 연구 분석

Clark 단위도법과 관련한 국내의 연구는 크게 매개변수의 추정 및 특성 분석, 매개변수 추정 방법 또는 이를 위한 회귀식 개발, 기존 매개변수 추정식의 검토 및 민감도 분석 등으로 구분할 수 있다. 먼저, 매개변수 추정과 관련해서는 주로 관측자료를 이용하여 매개변수를 추정하는데 초점이 맞추어져 있다. 주로 최적화 기법을 이용하여 매개변수를 추정하게 되는데, 관련 연구로서 백정록 등(2000), 윤용남 등(2002), 성충현(2003) 등을 살펴볼 수 있다. 반면에 윤석영과 홍일표(1995), 이정식 등(1997), 윤태훈과 박진원(2000), 전민우 등(2005) 등의 연구는 주로 실측된 수문곡선으로부터 매개변수를 추정한 연구에 포함된다. 성기원(1999), 성기원(2003)의 연구는 지형형태학적인 특성을 이용하며 매개변수를 추정하는 방식을 제시한 연구이고, 윤여진과 정순우(1998), 정대명과 배덕효(2003), 이상진 등(2004), 강성규 (2004) 등의 연구는 기존 경험식을 적용하여 매개변수를 추정하고 검토한 연구에 해당한다.

그러나 이러한 연구들 중 주어진 유역에 대표할 수 있는 매개변수의 결정방법을 제시한 연구는 없다. 즉, 대부분의 연구가 불충분한 관측 강우사상을 이용하여 수행되었고, 따라서 이들 자료로부터 추정된 매개변수들 또는 그들의 평균이 유역의 대표성을 가지리라는 보장이 없다. 특히, 산술평균이 갖는 대표성의 정당성은 그 분포가 정규분포 또는 최소한 대칭성(symmetry)을

갖는 분포에 한정되므로, Clark 단위도의 매개변수가 왜곡된 분포를 갖는 경우 산술평균은 상대적으로 편이된(biased) 대표값이 될 가능성이 크다.

기본적으로, 수문자료의 부정확성과 같은 문제는 접어들더라도 사용된 강우-유출사상의 절대수 부족, 다양한 유역면적의 고려 부족, 아울러 대상지점수의 부족 등 많은 문제점은 쉽게 간과하기 어렵다. 이러한 문제점은 유도된 결과의 일반적인 적용을 가로막는 중요한 원인이 된다. 특히, 주어진 지점 또는 유역에서의 강우사상의 수에 제한이 가해지는 경우 다양한 특성의 호우사상(강우강도, 지속시간, 시간분포, 공간분포, 방향성, 이동속도, 기온 등)이나 다양한 유역의 조건(선행강우, 식생 등)을 고려하기 어려워 결국 그 유역을 대표하는 단위도의 결정은 어려워 질 수밖에 없다.

3. 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 57개 사상을 선정하여 이용하였다.

4. 저류상수 및 집중시간의 특성 분석

4.1 관측 강우사상의 특성 정리

강우-유출 사상의 특성으로 고려한 것은 강우특성인자 및 기온, 풍향 등을 포함한 기상특성인자, 식생 및

토양수분으로 대표되는 유역특성인자, 마지막으로 Clark 단위도의 매개변수인 저류상수와 집중시간으로 대표되는 유출특성인자 등이다. 일반적으로 고려되는 유역의 지형적인 특성은 본 연구의 목적이 주어진 하나의 유역에서의 유출특성과 관련이 있으므로 배제된다.

먼저 저류상수 및 집중시간의 추정은 대상유역에서 측정된 유출자료를 이용하였다. 즉, 측정된 유출자료와 Clark 단위도를 이용한 유출결과를 비교하여 가장 작은 RMSE(Root Mean Square Error)값을 주는 저류상수와 집중시간으로 결정하였다. 강우의 특성인자들은 시 강우자료를 이용하여 정량화 하였고 각각 총강우량, 최대강우강도(시강우), 강우지속시간(시간), 평균강우강도 등이다. 기상특성인자는 일 기상자료를 이용하였으며, 온도, 증발량, 일사량, 운량, 일조시간, 풍향, 풍속, 습도 등을 포함한다. 유역의 특성인자로는 토양수분의 상태와 식생의 상태를 고려하였으며 이들의 정량화를 위해서는 각각 선형 5일 강우량 및 년 중 Julian Day를 이용하였다. 특히, 식생조건은 주어진 대상유역에서의 식물 활성도로서 그 차이를 개략적으로 반영할 수 있는 가장 적절한 대안이 년 중 Julian Day가 된다. 마지막으로 유출특성으로 집중시간과 저류상수가 사용되는데 각각 관측자료를 이용하여 추정하게 된다. 유효우량을 결정하는 데에는 SCS 방법을 적용하였다. 이러한 결과는 각각 Table 1과 같이 요약된다. 참고로 Table 1 중 풍향은 16개의 방향으로 운량은 0~10의 단위로 나타난다. 아울러 Fig. 1은 관측된 유출자료와 추정된 Clark 단위도의 매개변수를 이용한 유출 모의결과를 비교한 것이다.

4.2 강우, 기상 및 유역특성의 정량화

각 호우사상별 여러 특성은 각각 확률밀도함수를 이

Table 1. Basic characteristics of several rainfall events selected as examples

DATE	Storm Starts	Storm Duration	Concentration Time (hr)	Storage Coefficient (hr)	CN	Total Rainfall Amount (mm)	Max. Rainfall Intensity (mm/hr)	Average Rainfall Intensity (mm/hr)	Antecedent 5 Day Rainfall (mm)	Base Flow (cms)	Temperature (°C)	Evaporation Amount (mm)	Net Radiation (MJ/m ²)	Wind Velocity (m/s)	Wind Direction	Humidity (%)	Cloud (0-10)	Sunshine (hr)
84-07-02	15	59	3.1	20.9	94.9	216.9	19.5	3.7	0.2	44.6	25.8	6.1	21.6	0.3	WSW	79	6.0	7.3
84-07-03											25.6	0.5	7.09	0.8	WSW	79	8.8	0.3
84-07-04											22.0	0.4	3.8	0.2	E	94	10.0	0.0
84-07-05											22.8	3.1	11.1	0.2	ENE	79	10.0	4.3
84-08-28	2	47	11.5	27.8	90.7	54.5	8.9	1.2	175.0	66.9	25.1	1.4	6.1	0.4	W	78	9.8	2.5
84-08-29											23.8	1.9	6.5	0.5	E	84	8.8	1.4
84-08-30											24.7	4.5	24.3	0.6	W	73	4.3	9.9
85-07-10	9	15	1.3	20.0	94.0	70.3	26.2	4.7	-	90.0	24.3	1.1	6.9	0.8	WNW	88	9.0	0.9
85-08-16	18	25	7.1	17.6	87.6	47.2	16.1	1.9	46.9	89.6	23.3	1.0	4.6	0.6	ESE	91	9.8	3.8
85-08-17											21.3	2.9	6.8	0.2	NW	98	10.0	0.0
86-10-10	19	13	11.3	35.1	87.7	54.3	7.2	4.2	34.0	53.3	14.9	0.9	1.6	0.8	ESE	78	10.0	2.8
86-10-11											13.0	0.7	1.3	2.1	ESE	68	10.0	1.1

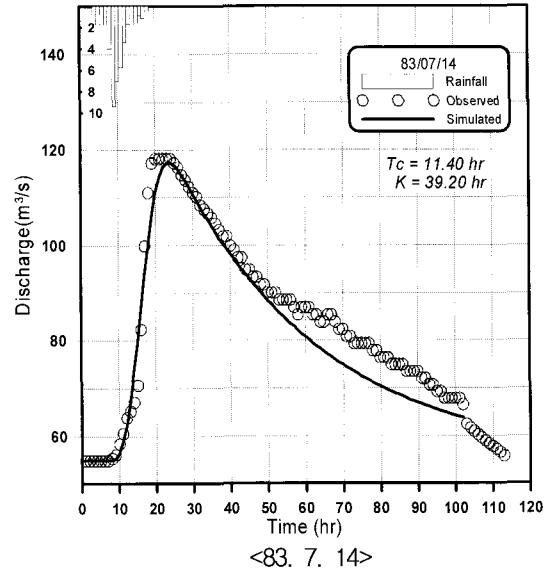
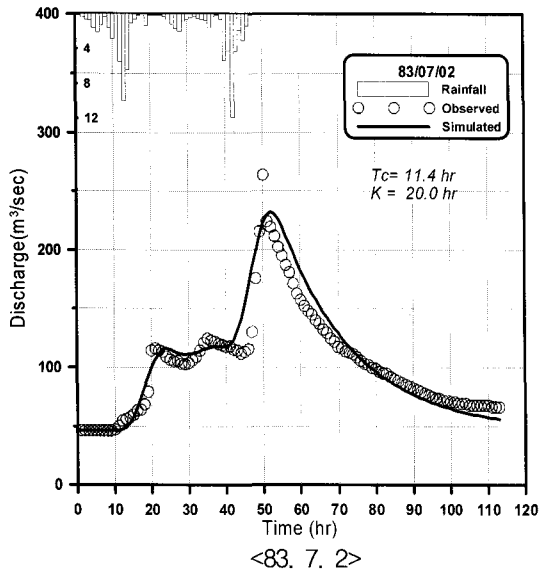


Fig. 1. Estimation of concentration time and storage coefficient of Clark unit hydrograph

용하여 정량화 될 수 있다. 그러나 각 특성인자들은 각기 다른 특성을 가지고 있으므로 동일한 확률밀도함수가 적용될 수는 없다. 먼저, 강우의 특성은 대체로 수공분야에서 많이 다루어 온 것들이므로 큰 문제가 없다. 그러나 풍속이나 식생 등은 순환되는 특성을 가지고 있어 소위 방향성의 고려가 필요하다. 운량이나 일조시간 등은 상하 한계가 분명하다는 특성을 반영하여야 한다. 먼저 사용된 기상자료 및 그 특성을 살펴보면 다음과 같다.

- 풍향: 평균풍향(0~360; 강우의 방향과 관측풍향 고려)
- 풍속: 강우발생시의 관측 평균 풍속(>0)
- 평균기온: 강우기간 내의 관측 평균기온
- 평균운량: 강우기간 내의 관측 평균운량(0~10)
- 일조시간: 강우기간 내의 관측 일조시간(0~24)

다음으로, 강우특성으로는 다음과 같은 인자들이 고려되었다.

- 총 강수량: 강우기간 내의 총 강수량 산정(>0)
- 강우강도(최대/평균): 강우기간 내의 최대, 평균 강우강도 산정(>0)
- 강우기간: 강우의 시작부터 종료 시까지의 기간(>0)

마지막으로 유역의 특성으로 다음의 인자들이 고려되었다.

- 식생: 1년을 365일로 하여(Julian Day) 산정(1~365)
- 선행 5일 강우량: 강우발생시점을 기준으로 선행 5일 강우량 산정(≥ 0)

위 자료들 중 풍향의 경우는 침두유출에 기여한 강우가 발생한 날의 풍향을 사용하였고, 북쪽을 기준으로 시계방향의 각도로 나타내었다. 풍속은 풍향이 발생한 날의 풍속을 사용하였다. 아울러 평균기온, 평균운량, 일조시간, 식생은 강우기간 동안의 값을 평균하여 사용하였다. 위 인자들 중 평균운량, 일조시간 등과 같이 상하 한계가 뚜렷한 경우는 beta 분포(두 개의 gamma 분포를 합성한 형태)를 평균기온의 경우는 정규분포를, 마지막으로 평균풍향이나 식생의 경우는 방향성이 있는 자료의 특성화에 가장 많이 이용되는 von Mises 분포를 이용하였다(Fisher, 1995; 부록 1 참고). 강우특성의 경우에 있어서는 log-normal, gamma 분포 등과 같은 확률밀도함수를 적합도 검정하여 최적 확률밀도함수가 선정되도록 하였다. 확률밀도함수의 적합도 검정을 위해 Kolmogorov-Smirnov test와 Chi-square test를 실시하였다. 이들 인자에 대해 검정결과는 아래 Table 2와 같으며, 아울러 Figs. 2~5는 기상, 강우, 유역, 유출 특성인자들에 따른 확률밀도함수를 도시한 것이다. 이때, 하나의 변수에 대하여 다수의 확률밀도함수가 적합도 검정을 통과한 경우, 오차가 가장 적은 확률밀도함수를 선정하였다.

특히, 집중시간의 경우는 그 분포가 상당히 왜곡된 형태여서 단순한 산술평균이 상당히 왜곡된 추정치를

Table 2. Decision of probability density functions of basin and meteorological factors considered
(O: accepted, X: rejected)

Factors		Temp	Cloud	Sunshine	Tc	K	Duration	Total Rainfall Amount	Max. Rainfall Intensity	Average Rainfall Intensity	Average Rainfall Amount	Wind
Normal	KS	O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	κ^2	O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Beta	KS	-	O	O	-	-	-	-	-	-	-	-
	κ^2	-	O	O	-	-	-	-	-	-	-	-
LN2	KS	-	-	-	O	O	O	O	O	O	O	O
	κ^2	-	-	-	O	O	O	O	O	O	O	O
LN3	KS	-	-	-	O	O	O	O	O	O	O	O
	κ^2	-	-	-	O	O	O	O	O	X	O	O
GAM2	KS	-	-	-	O	O	O	O	O	O	O	O
	κ^2	-	-	-	X	O	O	O	O	O	O	X
GAM3	KS	-	-	-	X	O	O	O	O	O	O	X
	κ^2	-	-	-	O	O	O	O	O	O	O	X

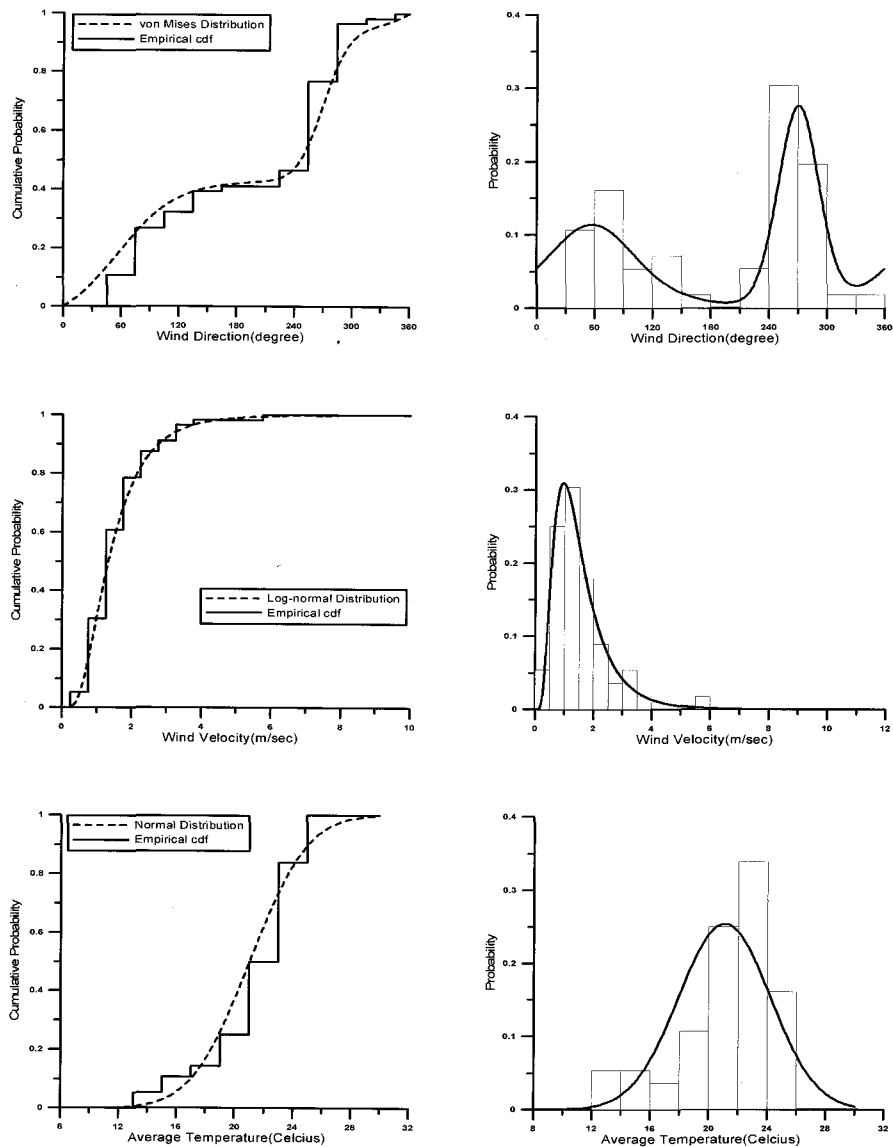


Fig. 2. Derivation of probability density functions of meteorological factors (from top, wind direction, wind velocity, average temperature, average cloudiness and hours of sunshine)

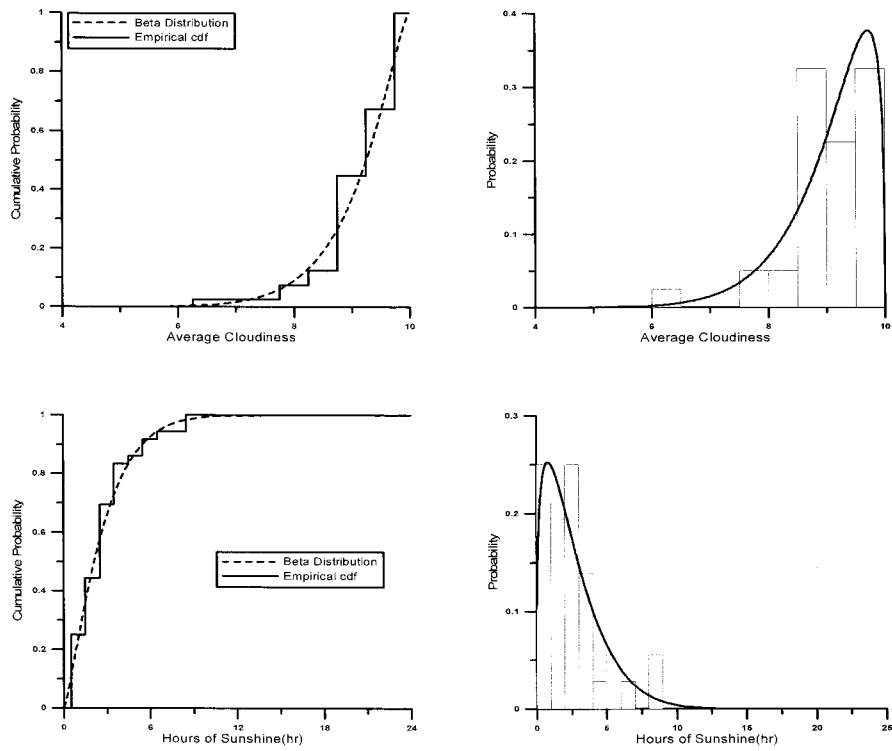


Fig. 2. Derivation of probability density functions of meteorological factors (from top, wind direction, wind velocity, average temperature, average cloudiness and hours of sunshine)(continued)

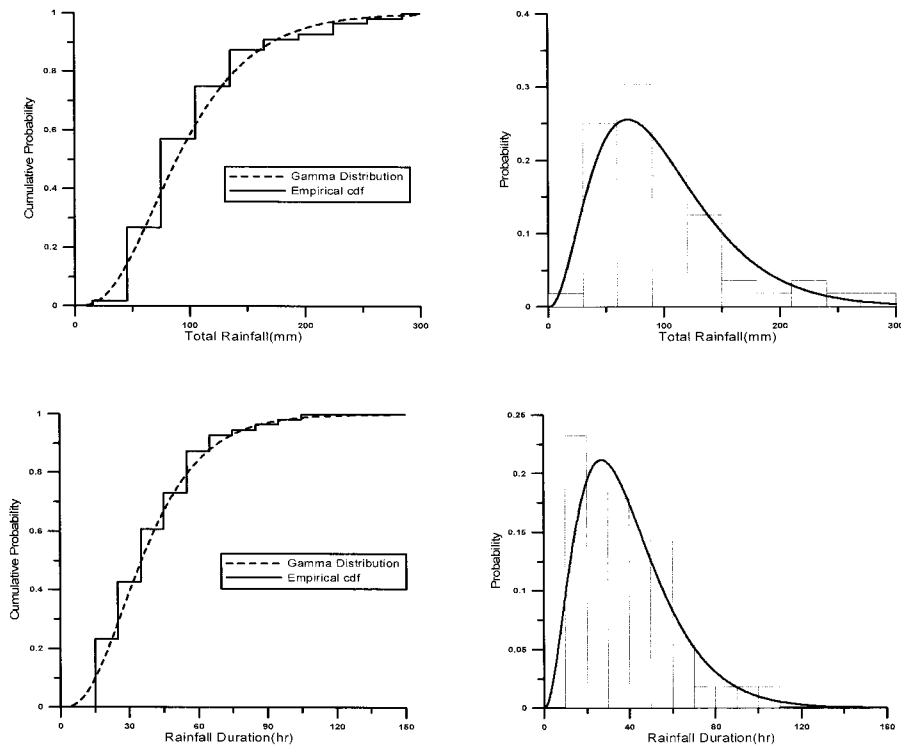


Fig. 3. Derivation of probability density functions of rainfall factors (from top, total rainfall, rainfall duration, maximum rainfall intensity and average rainfall intensity)

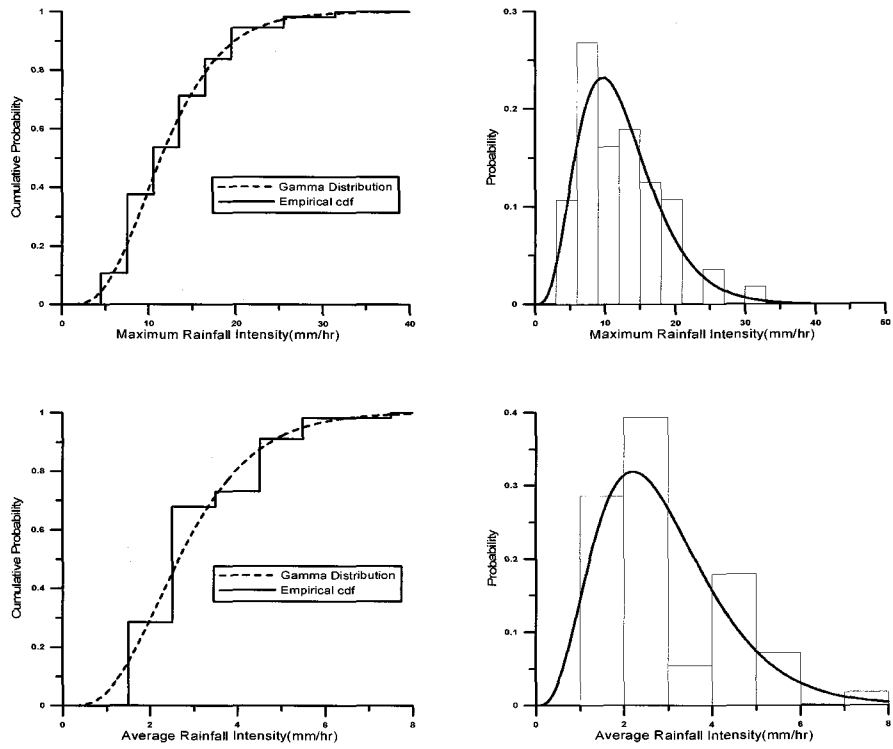


Fig. 3. Derivation of probability density functions of rainfall factors (from top, total rainfall, rainfall duration, maximum rainfall intensity and average rainfall intensity)(continued)

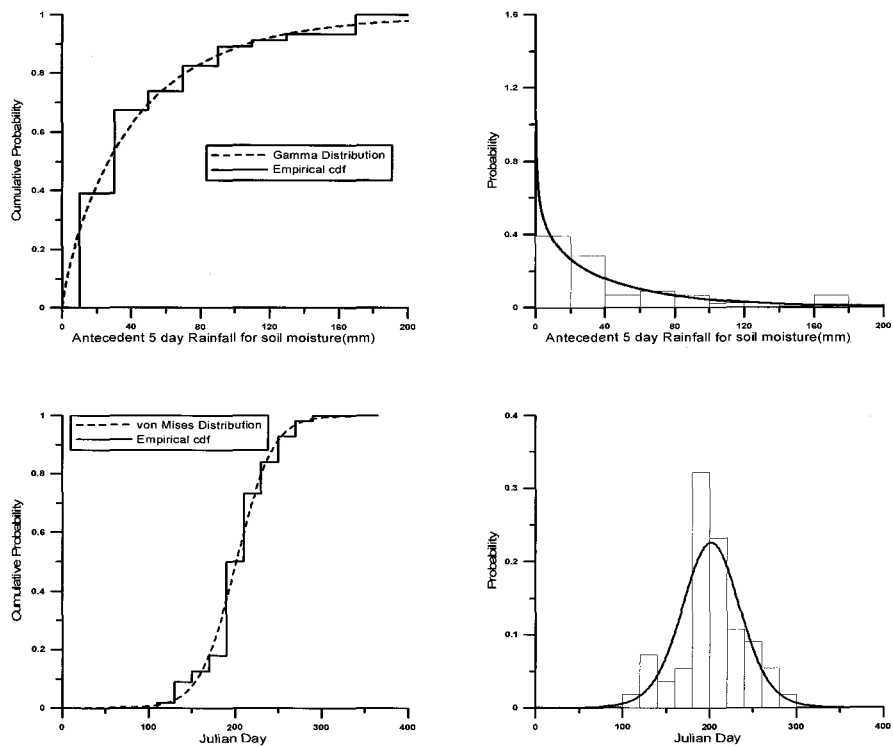


Fig. 4. Derivation of probability density functions of basin factors (from top, antecedent 5 day rainfall for soil moisture and Julian day)

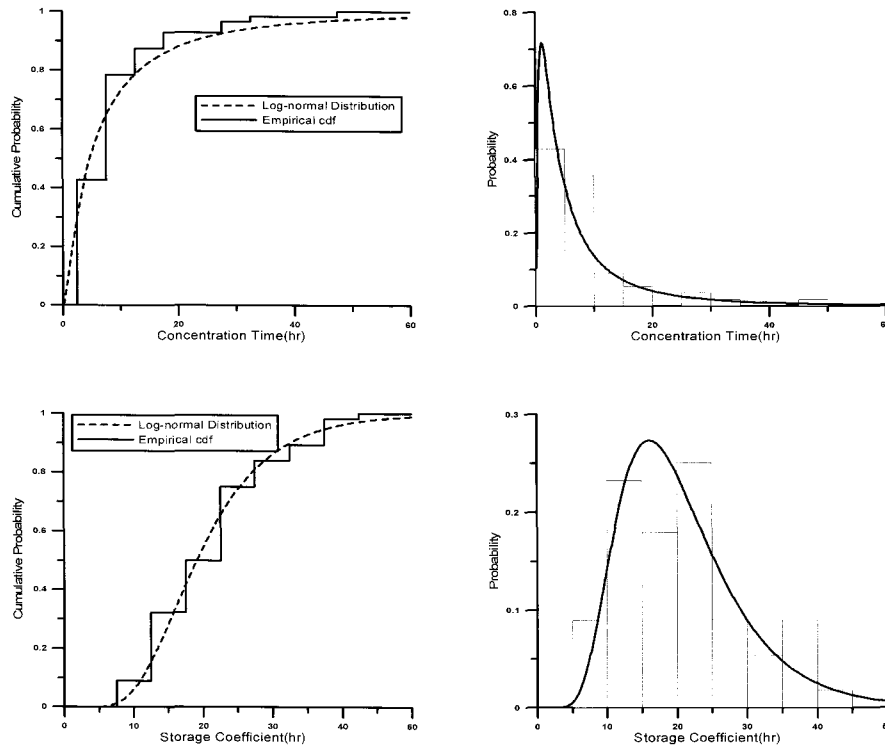


Fig. 5. Derivation of probability density functions of runoff factors (from top, concentration time and storage coefficient)

제시한다는 점에 주목할 필요가 있다. 즉, 정규분포에 근거한 평균값인 산술평균은 더 이상 집중시간에 대한 대표값의 역할을 하지 못한다. 오히려 최빈값의 경우가 보다 대표성을 갖는 것으로 판단된다. 반면에 저류상수의 경우는 거의 대칭인 분포를 하고 있으므로 산술평균이 어느 정도의 대표성을 확보한다고 판단할 수 있다.

5. 평균적인 유역 및 기상상태에서의 저류상수 및 집중시간 검토

관측자료가 가용한 경우 유역과 기상의 평균적인 상태를 고려하여 이때의 유출특성을 분리할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같이 유출에 영향을 주는 것으로 가정된 인자들이 평균적인 값을 가질 때의 상황에서 유역의 평균적인 유출특성(즉, 집중시간과 저류상수)이 결정될 수 있는 것으로 가정하였다. 그러나 현실적으로 모든 영향인자가 평균 정도를 나타내는 강우-유출 사상을 분리하는 것이 어려우므로, 각 인자별로 결정된 확률밀도함수를 고려하여 평균의 신뢰구간을 고려하여 평균적인 강우-유출사상들이 선택될 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 95%, 90%, 85%의 신뢰수준을 각각 고려하였다. 아울러 선행 5일 강우, 평균운량, 일조시간의 경우는 확률밀도함수가 혼합분포로 추정되었기 때문에 단측의 신

뢰구간을 설정하여 고려하였다. 따라서 이 경우 앞에서 추정된 분포형의 최빈값, 평균값과는 약간의 차이를 보이게 된다. 신뢰구간의 설정방법은 양측의 경우 확률밀도함수의 양측에서 $(100 - \text{신뢰수준})/2$ 를 제외하는 방법을 적용하였다.

각 특성인자들이 Table 3과 같이 결정된 신뢰구간 내에 있는 경우에 해당하는 강우-유출사상이 유역의 대표 사상으로 선정되며, 이 사상들에 대한 집중시간과 저류상수의 범위를 조사하여 그 변동성 또는 불확실성을 추정하였다. 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. 각각의 경우 집중시간과 저류상수, 최대값, 최소값, 평균은 Table 4와 같다.

Table 4를 보면 신뢰수준 95%의 경우, 집중시간의 평균은 11.58시간, 저류상수의 평균은 22.64시간으로 나타난다. 하지만, 그 범위가 각각 1.2 - 50, 8.7 - 41로 매우 넓게 나타나므로 불확실성은 여전히 매우 크다고 판단할 수 있다. 반면에 신뢰수준 90%의 경우 평균값 자체는 유사하게 나타나지만 그 신뢰구간은 다소 작아지는 것을 알 수 있다. 그러나 85%의 신뢰수준에 대해서는 신뢰구간 자체는 크게 변하지 않고 오히려 평균값이

Table 3. Affecting factors and their mode, mean and confidence interval (C.I.)

Factors	Mode	Mean	95% C.I.	90% C.I.	85% C.I.
Rainfall Duration (hr)	27.1	39.2	8.73~92.33	11.37~80.76	13.39~73.74
Total Rainfall (mm)	69	97.6	22.63~229.44	29.31~201.02	34.37~183.76
Max. Rainfall Intensity (mm/hr)	9.63	12.3	3.77~25.68	4.63~22.88	5.25~21.16
Avg. Rainfall Intensity (mm/hr)	2.2	2.86	0.83~6.19	1.03~5.49	1.17~5.06
Antecedent 5 Day Rainfall (mm)	0	39.49	0~131.68	0~96.39	0~76.11
Avg. Temperature (°C)	21.07	21.07	14.92~27.22	15.91~26.23	16.56~25.59
Avg. Wind Velocity (m/s)	0.954	1.56	0.429~4.116	0.51~3.43	0.58~3.05
Wind Direction (°)	57.32	57.32	-51(314)~165	-34(331)~148	-22(343)~137
	270.74	270.74	228~313	235~306	240~302
Avg. Cloudiness	10	9.34	7.84~10	8.29~10	8.58~10
Hours of Sunshine (hr)	0	1.69	0~5.93	0~4.64	0~3.83
Vegetation (Julian day)	201.5	201.5	128.4~274.2	141.7~260.8	150.1~252.7

Table 4. Some statistics of selected rainfall events (μ and $\exp(\mu_{\log})$ locate the mean and mode, respectively)

Significance Level	Basic Statistics		Concentration Time (hr)	Storage Coefficient (hr)
	Mean	μ $\exp(\mu_{\log})$		
95%	Mean	μ	11.58	22.64
		$\exp(\mu_{\log})$	6.84	20.70
	Min.	1.2	8.7	
	Max.	50	41	
90%	Mean	μ	11.53	22.87
		$\exp(\mu_{\log})$	7.99	21.74
	Min.	2.0	13.5	
	Max.	33.5	39.2	
85%	Mean	μ	12.26	23.76
		$\exp(\mu_{\log})$	12.86	23.23
	Min.	2.0	17.4	
	Max.	33.5	39.2	

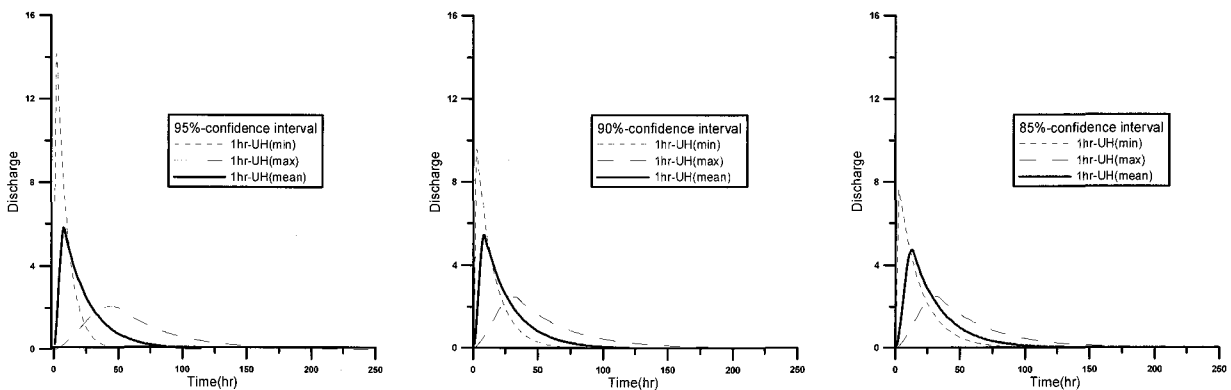


Fig. 6. One-hour UH derived using mean, maximum and minimum concentration times and storage coefficients for given significance levels of 95%, 90% and 85%

크게 변하는 것을 알 수 있다. 이는 고려되는 강우사상의 수가 급격히 줄어들에 따라 편의가 급격히 커졌기 때문이다. 집중시간 및 저류상수의 확률분포특성을 고

려할 때 집중시간은 대략 7시간 정도 저류상수는 대략 22시간 정도가 이 유역을 대표하는 적절한 값으로 판단 된다. 이와 같은 3가지 신뢰수준에 대해 유도되는 Clark

단위도는 Fig. 6과 같다.

이상과 같은 결과로 판단해 볼 때 유역을 대표하는 유출특성(즉, 집중시간 및 저류상수)의 결정에는 관측 강우-유출사상의 수가 어느 정도 확보된다고 하더라도 여전히 높은 불확실성을 피하기 힘들다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Clark 단위도법의 매개변수 추정방법을 검토하고, 이와 관련된 기존 연구성과를 평가하여 유역을 대표하는 매개변수의 결정과정의 문제점을 파악하였다. 아울러 강우-유출과정에 영향을 미치는 유역 및 기상 특성인자들을 확률밀도함수를 적용하여 정량화하고, 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.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다. (1) 유역을 대표하는 유출특성(즉, 집중시간 및 저류상수)의 결정에는 관측 강우-유출사상의 수가 어느 정도 확보된다고 하더라도 여전히 높은 불확실성을 피하기 힘들다. (2) 집중시간의 경우는 그 분포가 상당히 왜곡된 형태여서 단순한 산술평균은 상당히 왜곡된 추정치를 제시한다. 즉, 정규분포에 근거한 평균값인 산술평균은 더 이상 집중시간에 대한 대표값의 역할을 하지 못한다. 오히려 최빈값의 경우가 보다 대표성을 갖는 것으로 판단된다. 반면에 저류상수의 경우는 거의 대칭인 분포를 하고 있으므로 산술평균이 어느 정도의 대표성을 확보한다고 판단할 수 있다. 집중시간은 매우 왜곡된 분포를 저류상수는 대칭형 분포특성을 나타내는데, 그 원인에 대한 물리적 고찰이 필요한 것으로 판단된다. 본 연구의 대상유역의 경우 집중시간은 대략 7시간 정도로, 저류상수는 대략 22시간 정도가 적절한 것으로 판단된다.

이상과 같은 결과는 제한된 관측자료가 가지는 한계를 관측자료만의 분석으로 크게 극복하기 어렵다는 것을 의미한다. 즉, 본 연구의 대상유역에 대한 집중시간의 추정치는 대략 7시간 정도로 나타나나 그 신뢰구간이 2 - 40시간 정도로 나타나 불확실성이 너무 크다. 저류상수의 경우도 도달시간보다는 불확실성이 작다고 판단할 수 있으나 역시 적절한 추정치로 22시간 정도에 그 신뢰구간이 10 - 40시간 정도로 역시 크게 나타난다. 이에 대한 보완 방안으로는, 즉, 신뢰구간을 좁힐 수 있는 방안으로, 관측된 집중시간 및 저류상수를

Bootstrap 기법으로 처리하여 분석하는 방안과 즉, 집중시간 및 저류상수를 강우, 기상, 및 유역 특성인자로 회귀분석하여 이를 Monte Carlo 모의기법을 통하여 분석하는 방안 등을 고려할 수 있다. 이러한 내용에 관해서는 본 연구의 다음 논문에 정리하였다.

참 고 문 헌

- 강성규 (2004). Clark 단위도법의 저류상수와 집중시간 간의 관계. 석사학위논문, 고려대학교.
- 건설교통부 (2004). 2003년 국제수문개발계획(IHP).
- 건설교통부 (2005). 홍수량산정 지침서, pp. 28-36.
- 김승, 김남원, 강태호, 김현준 (1993). "설계홍수 추정방법 개발을 위한 설문 조사(I)." 한국수자원학회 논문집, 제26권, 제1호, 한국수자원학회, pp. 27-37.
- 백경록, 최종남, 유철상, 김중훈(2000). "강우-유출관계의 변동성에 관한 고찰.", 대한토목학회논문집, 제20권, 제3-B호, 대한토목학회, pp. 377-386.
- 성기원 (1999). "유역의 상사성을 이용한 Clark 모형의 매개변수 해석." 한국수자원학회논문집, 제32권, 제4호, 한국수자원학회, pp. 427-435.
- 성기원 (2003). "Gamma 분포형 함수 적합을 이용한 Clark 모형의 매개변수 간접추정." 한국수자원학회 논문집, 제36권, 제2호, 한국수자원학회, pp. 223-235.
- 성충현 (2003). HEC-HMS 모형을 이용한 단위도 모형 비교연구. 석사학위논문, 서울대학교.
- 윤석영, 홍일표 (1995). "Clark 모형의 매개변수 산정방법 개선." 대한토목학회논문집, 제15권, 제5호, 대한토목학회, pp. 1287-1300.
- 윤여진, 정순우 (1998). "강우분포형태에 따른 임계지속기간의 변화 연구-산본 유역을 중심으로." 한국수자원학회논문집, 제31권, 제4호, 한국수자원학회, pp. 375-384.
- 윤용남 (1998). 공업수문학. 청문각, pp. 350-357.
- 윤용남, 김중훈, 유철상, 김상단 (2002). "공간분포된 강우를 사용한 유출 매개변수 추정 및 강우오차가 유출계산에 미치는 영향분석." 한국수자원학회논문집, 제35권, 제1호, 한국수자원학회, pp. 1-12.
- 윤태훈, 박진원 (2000). "Clark 단위도의 저류상수산정방법의 개선." 2002년 한국수자원학회 학술발표회 논문집(III), 한국수자원학회, pp. 1334-1339.
- 이상진, 최현, 신희범, 박상길 (2004). "수공구조물 설계를 위한 PMP 및 임계지속시간 분석." 한국수자원학회논문집, 제37권, 제9호, 한국수자원학회, pp.

707-718.

이정식, 이재준, 손광익 (1997). "중소 하천유역에서 강우-유출관계의 개념적 모형 비교연구 -위천 유역을 중심으로." **한국수자원학회논문집**, 제30권, 제3호, 한국수자원학회, pp. 279-291.

전민우, 조용수, 김훈 (2005). "지형학적 인자에 의한 유역 저류상수 결정." **건설기술연구소논문집**, 제24권, 제1호, 건설기술연구원, pp. 149-160.

정대명, 배덕효 (2003). "시간-면적곡선의 유역유출해석 영향분석." **한국수자원학회논문집**, 제36권, 제2호, 한국수자원학회, pp. 211-221.

Fisher, N.I. (1995). *Statistical Analysis of Circular Data*, Cambridge University Press, p. 277

Peters, J. (1993). "Flood Plain Hydrology Using Computer Programming HEC-1 on IBM Compatible Personal Computers." Lecture #6 Unit Hydrology Development, HEC-1 Course-University Extension, U.C. Davis.

Sabol, G.V. (1988). "Clark Unit Hydrograph." *Transactions of the ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 1, pp. 103-111.

US Army Corps of Engineers(2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS(Technical Reference Manual)*, pp. 62-63.

부록: von Mises 분포

von Mises 확률밀도함수는 다음과 같이 정의된다.

$$f(\theta) = [2\pi I_0(\kappa)]^{-1} \exp[\kappa \cos(\theta - \mu)], \quad (A-1)$$

$$0 \leq \theta < 2\pi, \quad 0 \leq \kappa < \infty$$

여기서,

$$I_0(\kappa) = (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} \exp[\kappa \cos(\phi - \mu)] d\phi \quad (A-2)$$

von Mises 확률밀도함수의 매개변수는 다음과 같이 평균(방향), 집중계수(concentration parameter), 모수표준오차를 이용하여 추정한다. von Mises 확률밀도함수의 적용과정은 다음과 같다. 먼저, 확률 p에 의하여

$VN(\mu_1, \kappa_1)$ 이 발생하고, 확률 $1-p$ 에 의하여 $VN(\mu_2, \kappa_2)$ 가 발생한다고 가정하면 매개변수 $\mu_1, \mu_2, \kappa_1, \kappa_2, p$ 를 이용하여 다음과 같은 여섯 개의 방정식을 쓸 수 있다.

$$pA_1(\kappa_1)\cos(\mu_1) + (1-p)A_1(\kappa_2)\cos(\mu_2) = \overline{C}_1 \quad (A-3)$$

$$pA_2(\kappa_1)\cos(2\mu_1) + (1-p)A_2(\kappa_2)\cos(2\mu_2) = \overline{C}_2 \quad (A-4)$$

$$pA_3(\kappa_1)\cos(3\mu_1) + (1-p)A_3(\kappa_2)\cos(3\mu_2) = \overline{C}_3 \quad (A-5)$$

$$pA_1(\kappa_1)\sin(\mu_1) + (1-p)A_1(\kappa_2)\sin(\mu_2) = \overline{S}_1 \quad (A-6)$$

$$pA_2(\kappa_1)\sin(2\mu_1) + (1-p)A_2(\kappa_2)\sin(2\mu_2) = \overline{S}_2 \quad (A-7)$$

$$pA_3(\kappa_1)\sin(3\mu_1) + (1-p)A_3(\kappa_2)\sin(3\mu_2) = \overline{S}_3 \quad (A-8)$$

여기서,

$$A_i(\kappa) = I_i(\kappa)/I_0(\kappa) \quad (i=1, 2, 3) \quad (A-9)$$

$$\overline{C}_i = \sum_{j=1}^n \cos(i\theta_j)/n \quad (i=1, 2, 3) \quad (A-10)$$

$$\overline{S}_i = \sum_{j=1}^n \sin(i\theta_j)/n \quad (i=1, 2, 3) \quad (A-11)$$

$$I_i(\kappa) = \sum_{j=0}^{\infty} [(j+i)!j!]^{-1} \left(\frac{1}{2}\kappa\right)^{2j+i} \quad (i=1, 2, 3 \dots) \quad (A-12)$$

위의 식들에서 좌변과 우변과의 잔차를 $\Delta C_1, \Delta C_2, \Delta C_3, \Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3$ 라 하면, 잔차의 제곱의 합을 최소화하는 매개변수 $\mu_1, \mu_2, \kappa_1, \kappa_2, p$ 를 추정할 수 있다 (Fisher, 1995).

(논문번호:06-64/접수:2006.06.13/심사완료:2007.01.19)