

운동파 모형에 의한 확률 홍수량 산정

김 한준¹⁾ · 김 병익²⁾ · 전경수³⁾

1. 서 론

하천정비기본계획 등에 있어서 설계 홍수량 산정을 위한 방법으로서 강우빈도 해석에 의하여 확률강우량을 산정하고 확률강우량에 따른 유출량을 계산하는 것이 일반화되어 있다. 이는 우리나라 중소하천 유역의 대부분이 미계측 유역이기 때문에 유량자료로부터 확률 홍수량을 직접 결정하기가 어려운 실정이기 때문이다. 이때 확률 강우량으로부터 홍수량을 산정하는 방법으로서 합성단위유량도 등이 널리 사용되고 있다. 합성단위유량도가 완전히 개념적인 모형들에 비해서는 유역의 지형적 특성을 어느 정도 반영한 것이기는 하나, 지역특성에 따라 변할 수 있는 매개변수들을 포함하고 있기 때문에 외국의 다른 지역을 대상으로 개발된 합성단위유량도들을 그대로 사용하는 경우 그 적용성에 관한 검토가 필요하다. 이에 비하여 물리적 내지는 수리학적 현상에 근거한 모의 모형으로서 매개변수에의 의존도가 상대적으로 적은 수리학적 모형들을 사용할 경우에는 이러한 불확실성을 비교적 감소시킬 수 있다는 측면이 있다. 이러한 수리학적 홍수추적 모형으로서 널리 사용되는 것으로서 운동파 모형을 들 수 있다(Ben-Zvi, 1991; Morel-Seytoux 등, 1993; Hromadka와 DeVries, 1988; Nwaogazie, 1988) 본 연구에서는 임진강 수계의 포천천 유역을 대상으로 하여, 운동파 모형에 의한 확률 홍수량을 산정하였다. 부분시계열 모형에 의하여 확률강우량을 산정하고, HEC-1 모형의 운동파 방법을 사용한 홍수추적 과정을 기술하기로 한다.

2. 적용 대상유역

포천천 수계는 포천천과 그 하류부에서 합류하는 명덕천으로 구성되어 있으며, 이들은 각각 고모천, 금현천, 우금천, 좌의천, 구읍천 등 5개 및 운악천, 길명천, 수일천 등 3개支류를 각각 갖고 있다. 표 1은 이들 각 상류수(headwater) 유역에 관한 개요를 요약한 것이며, 유역에 관한 상세한 내용은 하천정비기본계획 보고서(경기도, 1998)에 기술되어 있다.

3. 확률 강우량의 산정

임진강 유역에는 철원 측후소와 김화, 대광리, 동두천, 광적, 포천, 창수, 일동, 임진각, 및 적성 등 기상청 관할의 9개 자동기상관측소(Automatic Weather System, AWS)가 있다. 이 중 포천 관측소가 유역 내에 위치하고어서 시간별 강우자료가 가용하나, 1990년부터 관측을 개시하여, 가용한 자료기간이 짧기 때문에 연 최대치 자료를 사용한 빈도해석 방법을 적용하기가 어렵다.

-
- 1) 성균관대학교 공과대학 토목환경공학과 석사
 - 2) 성균관대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정
 - 3) 성균관대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수

표 1. 포천천 유역의 개요

하천명	유역면적 (km ²)	유로연장 (km)	유역평균폭 (A/L)	형상계수 (A/L ²)	평균경사 (%)
포천천	239.55	32.00	7.49	0.234	20.29
고모천	13.15	6.42	2.05	0.319	14.74
금현천	10.05	7.00	1.44	0.205	7.74
우금천	17.91	9.72	1.84	0.190	21.78
좌의천	9.21	5.20	1.77	0.341	6.37
구읍천	15.60	8.20	1.90	0.232	19.95
명덕천	60.78	16.30	3.73	0.229	25.29
운악천	12.70	6.35	2.00	0.315	31.23
길명천	8.86	4.45	1.99	0.447	14.28
수일천	9.06	4.68	1.94	0.414	35.72

따라서 본 연구에서는 부분시계열 자료(Partial Duration Series)를 사용한 빈도해석을 수행하였으며, 그 방법으로는 POT(Peaks Over Threshold) 방법(Kottegoda, 1980)은 연 최대치 자료를 사용하기에는 자료가 불충분할 경우에 어떤 기준치(Threshold Level, i_o)를 정하여, 이를 초과하는 첨두치(Peak)들을 부분시계열 자료(Partial Duration Series)로 하여 빈도해석을 행하는 방법으로서 통상 하천유량에 대한 부분시계열 빈도해석 방법으로 사용된다.

기준치 i_o 는 주어진 자료의 연 최대치 중 가장 작은 값으로 정할 수도 있고, 매년 3~5개의 첨두치를 포함하도록 임의로 정할 수도 있다. 또한 2개 이상의 첨두치가 연속해서 발생한 경우에는 이들이 서로 무관한, 즉 별개의 호우사상에 의하여 발생한 것이면 각각 독립된 첨두치로 간주하고, 그렇지 않을 경우에는 이 중 가장 큰 첨두치를 선택한다. 이와 같이 연 평균 ν 개의 첨두치를 선택하였다고 하면 i_o 보다 큰 첨두치의 연간 발생 횟수 N 은 확률 변수로서 Poisson 분포를 따른다. 즉,

$$P_r \{ N = n; \nu \} = \nu^n e^{-\nu} / n! \quad (1)$$

따라서, 첨두치 발생 사이의 시간 T 는 지수분포(Exponential Distribution)를 따른다. 즉,

$$P_r \{ T > t \} = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

한편, i_o 를 넘는 강우강도 I 는 보통 지수분포를 따르는 것으로 가정할 수 있다. 즉,

$$P_r \{ I > i(T_r) \} = e^{-\lambda[i(T_r) - i_o]} \quad (3)$$

여기서 $i(T_r)$ 은 T_r 년 빈도의 강우강도를 뜻한다.

T_r 년 빈도의 강우강도는 평균적으로 $\nu \cdot T_r$ 번의 호우에 한 번 일어나는 강우강도의 크기이며므로

$$e^{-\lambda[i(T_r) - i_0]} = \frac{1}{\nu \cdot T_r} \quad (4)$$

로 되고, 이로부터 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$i(T_r) = i_0 + \ln(\nu \cdot T_r) / \lambda \quad (5)$$

여기서 기준치 i_0 와 상수 ν 및 λ 의 값을 추정함으로써 T_r 년 빈도의 첨두치 $i(T_r)$ 을 구할 수 있다. i_0 , ν 및 λ 의 추정은 각각 다음의 식에 따른다.

$$\nu = \frac{N}{Y} \quad (6)$$

$$\lambda = \{(N-1)/N\} / (\bar{i} - i_{(1)}) \quad (7)$$

$$i_0 = i_{(1)} - \frac{1}{N \cdot \lambda} \quad (8)$$

여기서 Y , N , \bar{i} 및 $i_{(1)}$ 은 각각 자료연수, Y 년간 발생한 POT Event의 수, N 개의 첨두치의 표 2는 빈도해석에 사용된 지속시간 1시간 및 2시간의 최대 강우강도 자료를 정리한 것이며, 이들 자료를 이용하여 구한 지속시간 1시간 및 2시간의 빈도별 강우강도는 각각 표 4.3.4 및 4.3.5에 정리하였다. 지속시간 2시간의 첨두값들을 정리한 것이며, 이들 자료를 이용하여 구한 지속시간 1시간 및 2시간의 빈도별 강우강도는 표 3에 정리하였다.

4. 운동파 계산모형에 의한 홍수량 산정

운동파 모형은 유역의 형상을 직사각형으로 단순화한다. 단순화된 모형은 하도(channel)와 지표 유출면(overland flow plane)으로 구성된다. 주어진 강우사상에 대하여 우선 지표면 유출량이 산정되고, 이는 하도의 축방 유입량으로, 즉 하도추적의 입력 자료로 주어지게 된다. 지표면 유출은 주 하도로 직접 유입하도록 모형을 구성할 수 있고, 집수하도(collector channel)를 통하여 주 하도로 유입하도록 할 수도 있다. 후자의 경우 주 하도로의 축방 유입량은 집수하도의 유출량으로서 주어진다. 이때 지표면 유출은 집수하도로 직접 유입하거나 부집수하도(sub-collector channel)로 유입한 후, 이를 통하여 집수하도의 축방 유입량으로 주어지도록 할 수 있다. 이와 같은 모형의 구성에 관한 상세한 설명은 HEC(1990)에 기술되어 있다.

운동파 모형의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (9)$$

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (10a)$$

$$= \alpha A^m \quad (10b)$$

여기서 A 는 통수 단면적, Q 는 유량, q 는 축방 유입량, R 은 통수반경, S 는 바닥경사, n 은 Manning의 조도계수이며, x 와 t 는 각각 공간과 시간을 나타내는 변수이다. 흐름 방향 경사와 Manning의 조도계수 및 통수단면적이 주어지면 α 와 m 의 값이 결정되어 결국 식 (10b)를 식 (9)에 대입하여 수치해석을 통하여 홍수량을 산정하게 된다. 지표면 유출에 대한 통수단면형은 광폭 직사각형으

로서, 이때 m 은 $-5/3$ 의 값을 가지며 a 는 다음과 같이 된다.

$$\alpha = \frac{1}{n} S^{1/2} W^{-2/3} \quad (11)$$

여기서 W 는 지표 유출면의 폭이다.

하도의 단면형으로는 원형, 삼각형, 정사각형, 광폭 직사각형 및 사다리꼴 단면형 중에서 선택하거나 대표적 단면의 형태를 입력할 수 있도록 되어 있다.

표 2. 빙도해석에 사용된 강우강도 자료

(a) 1시간 강우강도

발생일시	강우강도 (mm/hr)	발생일시	강우강도 (mm/hr)
1993년 6월 13일 1시	24.5	1996년 8월 8일 9시	25.5
7월 11일 14시	25.0	1997년 5월 30일 15시	18.0
7월 17일 16시	19.0	6월 26일 1시	33.0
8월 13일 2시	20.0	7월 1일 5시	22.0
1994년 6월 26일 3시	17.5	7월 15일 18시	21.5
7월 5일 8시	32.0	1998년 5월 2일 5시	37.0
7월 10일 10시	19.0	6월 26일 3시	20.0
9월 28일 18시	25.0	7월 16일 2시	20.5
1995년 8월 8일 13시	36.5	8월 6일 1시	64.0
8월 24일 4시	39.5	1999년 8월 1일 1시	37.0
1996년 6월 23일 20시	22.0	2000년 7월 22일 8시	23.0
7월 26일 13시	32.5	8월 28일 5시	39.0

(b) 2시간 강우강도

발생일시	강우강도 (mm/hr)	발생일시	강우강도 (mm/hr)
1993년 6월 13일 2시	16.25	1997년 5월 7일 14시	12.75
7월 11일 14시	13.0	6월 26일 2시	25.75
7월 17일 16시	12.5	7월 1일 6시	16.25
8월 13일 2시	14.0	7월 15일 18시	17.5
1994년 6월 26일 4시	13.0	1998년 5월 2일 6시	28.75
7월 6일 6시	14.25	6월 26일 4시	15.0
9월 28일 18시	19.5	7월 16일 2시	14.0
9월 17일 10시	12.5	8월 6일 2시	58.0
1995년 8월 8일 14시	24.25	1999년 8월 1일 2시	31.75
8월 24일 4시	27.0	9월 19일 14시	12.0
1996년 7월 26일 18시	19.0	2000년 7월 22일 8시	21.25
8월 8일 10시	13.0	8월 28일 8시	29.0

표 3. 1시간 강우강도에 대한 빈도해석 결과 (단위:mm/hr)

재현기간 (년) 지속시간	1	5	10	25	50	100	200	i_o
1시간	29.1	46.8	54.5	64.5	72.2	79.8	87.4	17.0
2시간	20.8	34.3	40.1	47.7	53.5	59.3	65.1	11.7

지배방정식 (9)는 쌍곡선형 편미분 방정식으로서 초기조건과 상류단 경계조건을 필요로 한다. 지표면 유출에 대한 초기조건은 건조조건($A=0, Q=0$)이며 상류단 경계조건 역시 영의 유량이 주어진다. 하도유출의 경우 초기조건은 지표면 유출의 경우와 동일하나 상류 유역으로부터의 유입량이 있는 경우에는 이 유입량이 상류단 경계조건으로 주어진다.

본 연구에서는 지표면 유출면과 주 하도만으로서 각 소유역에 대한 모형을 구성하였다. 각 소유역의 지표면 유출거리는 해당 유역면적을 하도길이로 나눈 값의 반으로서 취하였다. 지표면경사는 지표면 유출에 대해서는 하천정비 기본계획 보고서(1998, 경기도)상의 값을 사용하였으며, 하도에 대해서는 최심하상고 자료를 이용한 회귀분석으로부터 추정된 평균 하상경사 값을 각각 사용하였다.

하도의 단면 형태는 삼각형 단면으로 하였다. HEC-1 모형에서 사용한 단면의 형태 중에서 원형의 경우에는 식 (10b)의 지수 m 은 $5/4$, 삼각형의 경우에는 $4/3$ 이며, 광폭 직사각형 또는 사다리꼴 단면의 경우에는 $5/3$ 의 값을 갖는다. 여기서는 삼각형 단면을 하도의 단면 형태로 선택하였다. 삼각형 단면에 대한 식 (10b)의 계수 a 는 다음과 같이 된다.

$$a = \frac{0.63}{n} \left(\frac{z}{1+z^2} \right)^{1/3} S^{1/2} \quad (12)$$

여기서 z 는 삼각형 단면의 옆벽 경사로서 모형의 입력변수이다.

운동과 모형의 입력변수인 z 의 값을 추정하기 위하여 우선 Q 와 $A^{4/3}$ 에 대한 선형 회귀분석으로부터 a 의 값을 추정하고 이로부터 식 (12)에 의하여 z 의 값을 산정하였다. 그림 1은 고모천에 대한 회귀분석의 결과를 예시한 것이며 추정된 a 와 산정된 z 의 값은 표 4에 정리된 바와 같다.

표 4. 각 소유역에 대한 a 와 z 값의 추정결과

소유역	고모천	금현천	우금천	좌의천	구읍천	운악천	길명천	수일천
a	0.918	0.709	1.107	0.782	1.163	1.581	0.870	1.408
z	5.202	5.038	6.287	3.874	7.800	5.527	10.448	8.017

강우 자료로는 1998년 포천읍 지역에 발생한 2시간 최대 강우량 116 mm/2h 및 빈도별 확률 강우량을 이용하여, 운동화 방법에 의하여 유량수문곡선을 도출하였다. 표 5는 1998년에 발생한 2시간 최대 강우량에 대하여 계산된 첨두유량 및 그 발생시각을 요약한 것이다.

참고문헌

- 경기도 (1998). 포천천수계 하천정비 기본계획.
한국수자원학회 (1998). '98 대홍수의 특성과 홍수피해조사.

- 한국수자원학회 (1998). '98 대홍수의 진단 및 재해극복 대책.
- 한국건설기술연구원 (1999). 1999년 8월 임진강 유역 대홍수.
- Ben-Zvi, A., Massoth, S., and Schick, A. (1991). "Travel time of runoff crests in Israel." *J. Hydrology*, Vol. 122, pp. 309-320.
- HEC (1990). *HEC-1 Flood hydrograph package: user's manual*. US Army Corps of Engineers.
- Hromadka, T.V., II, and DeVries, J.J. (1988). "Kinematic wave routing and computational error." *J. Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 2, pp. 207-217.
- Morel-Seytoux, H.J., Fahmy, H., and Lamagat, J.P. (1993). "A composite hydraulic and statistical flow-routing method." *Water Resources Research* Vol. 29, No. 2, pp. 413-418.
- Nwaogazie, I.L. (1987). "Comparative analysis of some explicit and implicit stream flow models." *Advances in Water Resources*, Vol. 10, pp. 69-77.

표 5. 운동파 방법으로 계산된 첨두유량과 도달시간

소유역	첨두유량 (m ³ /s)	도달시간 (hour)	소유역	첨두유량 (m ³ /s)	도달시간 (hour)
고모천	123	2.41	구읍천	190	2.14
금현천	115	2.28	운악천	166	2.08
우금천	213	2.14	길명천	111	2.14
좌의천	102	2.28	수일천	122	2.01

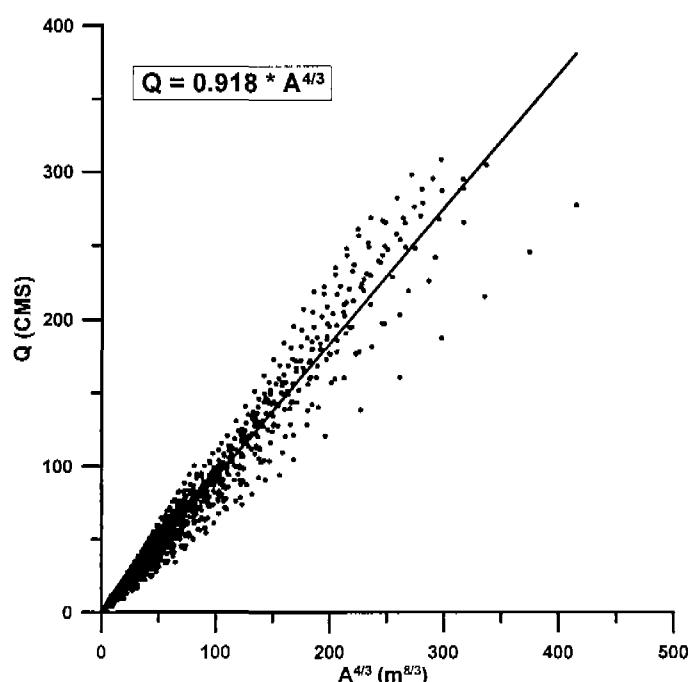


그림 1. 운동파 모형의 입력변수 추정을 위한
회귀분석(고모천)