

소유역의 응답시간특성 산정방법에 따른 시간-면적도의 작성과 적용

(Construction and Application of Time-Area Diagram according to The Methods of Estimation for Response Time Characteristics in Small Watershed)

발표자 : ○ 윤석영¹⁾, 홍일표²⁾

1. 서론

홍수에경보 시스템구축 및 수공구조물 설계시 필요한 유출량을 산정하기 위해서는 강우-유출 분석이 필요하다. 이는 대부분 기 관측된 강우-유출자료를 이용하여 직접 분석하거나 단위도법, 유역 홍수추적법등과 같은 적절한 모형을 사용하여 분석된다.

홍수유출은 유역 수문특성과 함께 유속과 같은 수리학적 특성에 지대한 영향을 받는다. 현재, 이들 특성과 관련된 대표적인 해석방법중의 하나인 Clark 유역추적법은 실질적으로 홍수량 산정에 많이 적용되고 있으며, 중소하천유역의 홍수유출 계산법으로 하천시설기준 하천편⁽¹⁾에 제시되어 있다.

그러나, Clark 유역추적법은 유역 저류상수인 K값과 경험식 등을 인용하여 그린 동시간도(isochrones)을 이용하여 시간-면적도(time-area diagram)를 유도하여야 하는 실무적인 어려움이 있다. 이와같은 어려움 때문에 이론적으로 우수한 기법임에도 불구하고 실무에서의 적용이 배제되어 왔다.

본 연구에서는 소유역의 응답시간특성 산정방법에 따른 시간-면적도를 구성하여 Clark 유역추적법의 적용성을 검증하고자 한다.

2. Clark의 유역추적법

Clark는 유역출구에 1개의 선형저수지가 존재하며, 이 선형저수지의 저류량(S)은 식(1)과 같이 유출량(Q)에 비례한다고 가정하였다.

$$S = K \cdot Q \quad (1)$$

여기서, K는 저류상수(storage constant)이다.

Clark 추적방법은 식(2)와 같은 저류방정식에 기초를 두고 있으며, 식(2)는 임의 구간내의 저류량의 변화율을 식(3)과 같이 구간의 상류단에서의 유입량과 하류단에서의 유입량의 차로 표시할 수 있다.

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{O_1 + O_2}{2} \Delta t = S_1 - S_2 \quad (3)$$

여기서, I_1 , O_1 , S_1 은 임의 시간 Δt 의 시점에서의 유입량, 유출량 및 저류량이며 I_2 , O_2 , S_2 는 Δt 의 종점에서의 값이고, Δt 는 추적기간이다. 식(1)를 식(3)에 대입하면 식(4)가 된다.

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{K(O_2 - O_1)}{\Delta t} \quad (4)$$

1) 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원

2) 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원

식(4)를 O_2 에 관해서 풀고 $I_1=I_2$ 로 대치하여 일반식으로 나타내면 식(5)와 같다.

$$O_i = C_{01}I_i + (1-C_{01})O_{i-1} \quad [L^3T^{-1}] \quad (5)$$

$$C_{01} = \frac{2 \Delta t}{2K + \Delta t}$$

여기서, O_i 는 i 시각 끝에서의 유출량, I_i 는 i 시각 끝에서의 유입량, C_{01} 는 무차원상수이다. 식(5)는 순간단위도이므로 식(6)을 이용하여 Δt 의 지속기간을 갖는 단위유량도로 환산하여 사용한다.

$$Q_i = 0.5(O_i + O_{i-1}) \quad [L^3T^{-1}] \quad (6)$$

여기서, Q_i 는 시간 t 에서의 단위도 종거이다.

3. 시간-면적도의 구성 및 유역응답 시간특성

Clark의 유역추적법에 적용되는 시간-면적곡선은 유출 수문곡선의 형상에 지대한 영향을 주며, 이를 유도하기 위해서는 유역응답 시간특성(response time characteristics)⁽²⁾이 필요하다. 유역응답 시간특성은 도달시간(time of concentration), 지체시간(lag time), 이동시간(travel time), 첨두발생시간(time to peak)등과 같은 여러가지 형태로 나타낼 수 있으며, 이들 시간특성은 수문학적 인 모형화와 설계에 중요한 인자이다. 현재 유역응답 시간특성을 산정하는 방법에는 크게 강우-유출 관계곡선과 경험식을 이용하는 방법으로 분류할 수 있으나, 본 연구에서는 유역평균유속을 이용하는 방법을 추가하였다.

이들 방법으로 산정된 유역응답 시간특성은 ARR(Australian Rainfall and Runoff)⁽³⁾에 제시된 모양-면적도(shape-area diagram)에 적용되어 시간-면적도를 구성하는데 이용된다.

3.1 시간-면적도의 구성 및 유입수문곡선의 산정

시간-면적도는 지형도를 이용해 구성되며, 이것은 유역의 임의 지점에서 출구까지의 이동시간 별 유량을 나타낸다. Pilgrim⁽⁴⁾은 임의 홍수에 대해 유역의 수로망을 흐르는 유속은 거의 일정하다는 것을 밝힌 바 있다. 이와같은 성질을 이용하여 시간-면적도는 지형도상의 하천길이를 구축할 수 있다. 즉, 유역을 소유역으로 분할하여 면적과 하천길이를 측정하여 유역폭을 산정한 다음, 본류를 따라 소유역의 하천길이별로 유역폭을 투영시키면 유역의 모양에 직접 비례하는 종거로 이루어진 모양-면적도를 구할 수 있다. 모양-면적도를 시간-면적도로 변환시키기 위해서는 모양-면적도의 횡거(base length)를 시간(base time)으로 변환시키는 것이 필요하다. 이를 위하여 모양-면적도의 횡거를 적당한 축척으로 분할하여 기 산정된 유역응답 시간특성을 균등하게 분할시킨 후, 각 시간구간에 할당된 면적을 계산하여 시간-면적도를 구축하며, 이를 식(7)에 적용시켜 유입수문곡선을 산정한다.

$$I_i = \frac{0.278a_i}{\Delta t} \quad (7)$$

여기서, I_i 는 i 번째 유입량(m^3/s), a_i 는 i 번째 시간-면적도의 면적(km^2)이다.

3.2 유역응답 시간특성

본 연구에 적용된 유역응답 시간특성은 다음에 제시될 방법(1), (2), (3), (4), (5)에 의해 각각 산정된 값을 공통적으로 C 라고 정의한다.

3.2.1 경험식을 이용하는 방법

경험식에 의해 산정된 유역응답 시간특성은 도달시간이며, 이 값은 유역의 가장 먼곳에 유입된 물입자가 유역출구에 도달하는데 소요된 시간으로 정의된다. 도달시간(t_c, min)을 산정하기 위해 식(8)과 같은 형태의 우리나라에 많이 소개되어 있는 Kirpich공식을 적용(방법 1)하였다.

$$t_c = 3.976 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (8)$$

여기서, L은 유역의 본류를 따라 측정된 유로연장(km), S는 평균경사이다.

3.2.2 수문곡선을 이용하는 방법

수문곡선에 의해 산정된 유역응답 시간특성은 도달시간과 지체시간이다. 그림(1)과 같이 도달시간은 강우-유출관계 곡선에서 유효우량이 끝나는 시점과 유출수문곡선의 변곡점사이의 시간차로 산정(방법 2)되며, 지체시간은 유효우량의 중심점에서 유출수문곡선의 중심점까지의 시간차로 산정(방법 3)된다.

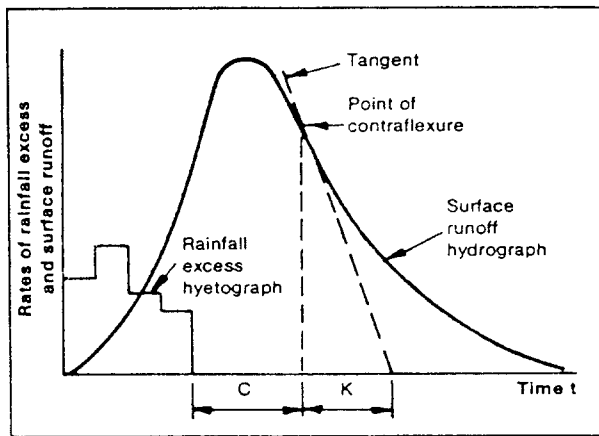


그림 1. 도달시간과 저류상수의 정의

3.2.3 유역평균유속을 이용하는 방법

유역평균유속에 의해 산정된 유역응답 시간특성은 이동시간이며, 이동시간은 물입자가 유역내 임의의 지점에서 출구까지 도달하는데 걸린 시간이다. 본 연구에서는 유역응답을 유도하기 위해 산정된 수로에서의 평균유속을 적용하였다. 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌(5), (6)을 참고하기 바란다.

이동시간을 산정하기 위해 하천평균길이와 최원점까지의 하천길이를 나누어 각각 적용하였다. 하천평균길이는 유역출구에서 1차하천까지의 길이를 각각 측정하여 1차하천의 총수로 나누어 산정(방법 4)하였다. 최원점까지의 하천길이는 유역출구에서 본류를 따라 분수계까지의 거리를 측정하여 산정(방법 5)하였다.

4. 저류상수의 산정

저류상수는 직접유출 수문곡선을 이용해 산정된 값을 적용한다. 저류상수는 그림(1)과 같이 수문곡선의 변곡점에 접선을 그려 시간축과 만나는 점과 변곡점사이의 시간차로 산정된다.

5. 적용 및 비교분석

5.1 강우-유출자료 및 시간-면적도

Clark의 유역추적법의 적용성을 검증하기 위하여 위천유역의 동곡지점을 대상유역으로 선정하였다. 강우-유출자료는 수자원관리기법 개발조사보고서⁽⁷⁾에 수록되어 있는 1시간 간격의 DT871, DT892 관측자료를 이용하였으며, 유효우량은 ϕ -index법을, 직접유출량은 수평직선분리법을 적용하였다.

1/50,000지형도를 이용하여 산정된 유역평균경사는 0.031이며, 모양-면적도는 그림(2)와 같이 동곡유역을 분할하여 그림(3)과 같이 구성하였다. 표(1)에 제시된 각각의 방법을 적용해 산정된 유역 응답 시간특성과 저류상수를 이용해 시간-면적도를 표(2)와 같이 산정하였다. 유역평균유속을 이용하는 방법에 적용된 하천평균길이는 5.67km, 최원점까지의 하천길이는 8.9km, 평균유속은 0.325m/s로 산정되었다.

5.2 적용성 검증 및 비교분석

표(2)를 Clark의 유역추적법에 적용하여 산정된 호우사상별 유출수문곡선은 그림(4), (5)와 같다.

Kirpich식에 의한 방법(1)은 다른 방법에 비해 첨두유량 발생시간이 조기에 발생하고 있다. 이와 같은 현상은 산정된 도달시간이 실제 유역에서 발생할 수 있는 도달시간보다 짧아서 일어나는 현상이며, 이는 유량의 흐름이 빠르다는 것을 의미한다. 결국, Kirpich식의 지역성을 반영하는 것으로 우리나라 하천에 적용할 때에는 세심한 주의가 필요함을 알 수 있다. Bell⁽⁸⁾은 Kirpich식이 수문곡선상의 평균상승시간(average rise time)을 도달시간으로 간주하여 유도되었으며, 관측된 상승시간과 Kirpich식으로 계산된 도달시간과의 상관계수가 0.3으로 매우 낮았음을 밝힌 바 있다.

수문곡선에 의한 방법(2)은 그림(1)과 같은 방법으로 C, K값을 산정해 계산 및 관측수문곡선을 비교하여 재현성을 검증함으로써 계측유역의 C, K값을 손쉽게 결정할 수 있었고, 재현성 또한 양호한 것으로 나타났다. 그러나, 지체시간을 이용한 방법(3)은 계산수문곡선의 재현성이 낮음을 알 수 있다. 이는 이미 저류효과가 고려된 C값에 저류상수 K를 적용시킨데서 오는 결과라 할 수 있다.

유역평균유속을 이용한 방법중, 하천평균길이를 적용한 방법(4)은 관측수문곡선과 비교해 보면, 재현성이 양호함을 알 수 있으며, 수문곡선에 의한 방법(2)와도 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이는 수로에서의 평균유속과 하천평균길이의 산정이 타당하였음을 반증하는 것이라 할 수 있다. 반면에 유역출구에서 최원거리를 하천길이를 적용한 방법(5)는 계산수문곡선의 재현성이 낮았으며, 오히려 지체시간을 이용한 방법(3)과 거의 일치하고 있다. 이와 같이 상이한 두 결과는 유역의 평균유속이 일정할 때, 하천의 길이에 의해서 도달시간의 크기가 결정되기 때문이다. 이를 통해 Clark의 유역추적법에서 도달시간은 평균적 개념의 하천길이를 택해야 함을 알 수 있다. 왜냐하면 Clark의 유역추적법은 앞에서 언급했듯이 유역의 이동과 저류효과를 분리한 개념적인 모형이기 때문에 각각의 효과를 분리하여 유도하지 않으면 안되기 때문이다. 하천길이를 유역출구에서 최원거리로 적용하였을 경우, 지체시간과 비슷한 개념으로 생각할 수 있다. 왜냐하면 유속이 같을 때 하천길이가 길 경우 상대적으로 지체효과가 크기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 방법(4)의 재현성이 높다할지라도 평균하천길이를 적용하였기 때문에 유속 0.325m/s를 이용해 동시간도를 그릴 수 없다. 평균유속을 이용해 실제 유역의 동시간도를 그리기 위해서는 하천길이 비율을 이용해 지체효과가 배제된 방법(4)의 유역 응답 특성시간과 같은 값을 얻을 수 있도록 평균유속을 수정하여야 한다. 이렇게 수정된 평균유속은 0.51m/s이며, 이값을 이용하면 동곡유역의 임의 지점의 이동시간을 산정할 수 있다.

이상의 결과를 종합해 보면, 방법(1), 방법(2), 방법(3)에 의해 수문곡선의 변곡점은 첨두까지의 상승시간과 지체시간 사이에 있음을 알 수 있다. 실질적으로 관측수문곡선상에서 변곡점의 결정은 어느정도 임의성이 존재하기 때문에 이에 대한 선정기준의 제시는 실무적인 측면에서 의의가 있다

고 생각된다.

또한 유역의 평균유속을 이용하면, Laurenson⁽⁹⁾이 정의한 바와 같은 이동시간을 산정할 수 있다. 이동시간은 일반적으로 물입자가 유역내 임의 지점에서 출구까지 이동하는데 걸린 시간으로 정의된다. 따라서, 유역의 다양한 지점에 대해 이동시간을 계산하면, 등시간도를 그릴 수 있으며, 이를 이용해 시간-면적도를 얻을 수 있다. 결국, 해당 유역의 수정된 유역평균유속은 방법(2)를 이용해 유역응답특성 C를 구하고 방법(4)와 같은 방법으로 평균하천길이를 산정한 후, 최원점까지 하천길이와의 비를 적용하면 쉽게 구할 수 있다. 그러나 유역평균유속은 적용식과 산정방법에 따라 어느정도 달라질 수 있음을 밝혀둔다.

향후, 재현성의 신뢰를 제고하기 위해서는 더 많은 유역에 대한 적용과 미계측유역에 적용할 수 있는 방법의 제시가 필요하다.

6. 결론

(1) 수문곡선에 의한 방법(2)와 유역평균유속에 의한 방법(4)가 관측수문곡선과의 재현성이 가장 양호하였다.

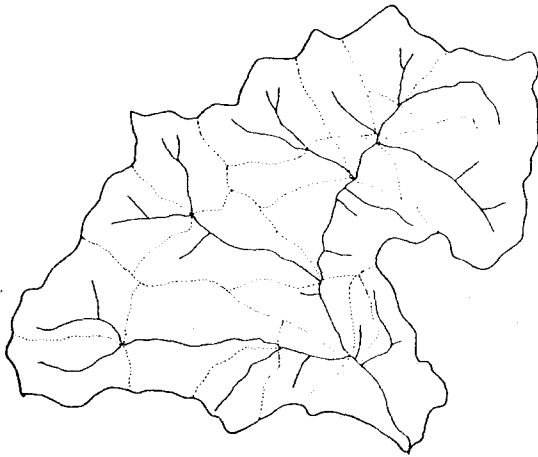
(2) 수문곡선의 변곡점은 첨두까지의 상승시간과 지체시간 사이에 있음을 확인할 수 있었다.

(3) 수문곡선에 의한 유역응답특성과 하천길이 비를 이용하여 해당유역의 유역평균유속을 산정할 수 있음을 확인하였다.

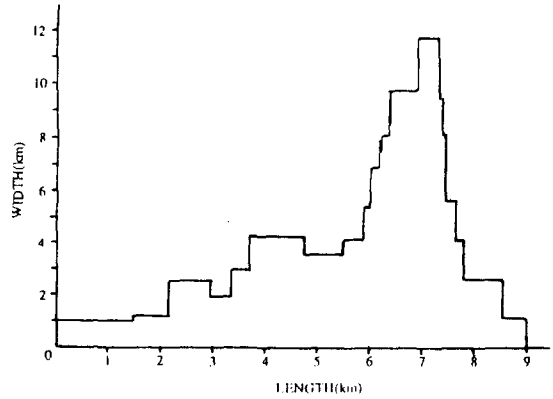
(4) 관측유역의 재현성이 높을 경우, 미계측 유역에 적용할 수 있는 경험식의 제시가 가능하리라 판단된다.

7. 참고 문헌

- 1) 건설부, "하천시설기준 하천편", 1993.
- 2) Singh, V.P, "Hydrologic System, Rainfall-Runoff Modeling, Vol.1", Prentice hall.
- 3) The Institution of Engineers, "Australian Rainfall and Runoff" Vol.1, 1987.
- 4) Pilgrim, D.H, "Isochrones Travel Time and Distribution Flood Storage from a Tracer Study on a Small Watershed.", W.R.R., Vol.13 No.3 1976, pp587-595.
- 5) 김재한, 윤석영, "소유역의 수로기하학적 특성과 사면을 고려한 유역순간단위도의 유도", 대한토목학회 논문집, 제13권, 제2호, 1993, pp161-171.
- 6) 윤석영 "수로망응답과 사면응답을 고려한 홍수유출 해석", 충남대학교 박사학위논문, 1993.
- 7) 건설부, "수자원관리기법 개발연구조사사업 보고서 별책부록 홍수수문자료집", 1991.
- 8) Bell, F.C, "Characteristic Response Times in Design Flood Estimation", J.of Hydrology, Vol.8, 1969, pp173-196.
- 9) Laurenson, E.M, "A Catchment Storage Model for Runoff Routing", J. of Hydrology, Vol.2, 1964, pp141-163.
- 10) Gupta, R.S, "Hydrology and Hydraulic Systems", Prentice Hall.
- 11) Singh, V.P, "Elementary Hydrology", Prentice Hall.
- 12) 윤용남, "공업수문학", 청문각.



그림(2) 동북관측지점의 유역 및 소유역분할도



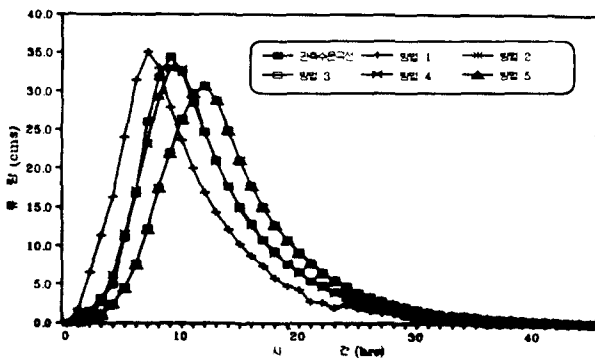
그림(3) 동북유역의 모양-면적도

표 (1) 방법별 유역응답특성 및 저류상수

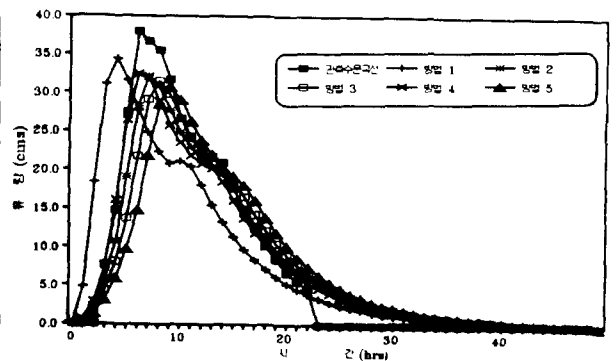
| 계산방법 | 호우사상 | C | K | C ₀₁ | C ₂ | |
|------------|-----------|-------|-----|-----------------|----------------|-------|
| Kirpich 공식 | 방법1 DT871 | 1.5 | 6 | 0.08 | 0.92 | |
| | DT892 | 1.5 | 6.5 | 0.074 | 0.926 | |
| 수문곡선 | 방법2 | DT871 | 5 | 6 | 0.154 | 0.846 |
| | | DT892 | 6 | 6.5 | 0.143 | 0.857 |
| | 방법3 | DT871 | 8 | 6 | 0.154 | 0.846 |
| | | DT892 | 7 | 6.5 | 0.143 | 0.857 |
| 유역평균 유역 수 | 방법4 | DT871 | 5 | 6 | 0.154 | 0.846 |
| | | DT892 | 5 | 6.5 | 0.143 | 0.857 |
| | 방법5 | DT871 | 8 | 6 | 0.154 | 0.846 |
| | | DT892 | 8 | 6.5 | 0.143 | 0.857 |

표 (2) 방법별 시간-면적도

| 방법 | 호우사상 | 유입 수문곡선(m ³ /s) | | | | | | | | | | |
|-------|-------|----------------------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 방법(1) | DT871 | 2.5 | 6.25 | 10.05 | | | | | | | | |
| | DT892 | | | | | | | | | | | |
| 방법(2) | DT871 | | 0.54 | | 1.1 | 2.00 | 3.64 | 2.12 | | | | |
| | DT892 | | 0.45 | | 0.81 | 1.45 | 1.66 | 3.93 | 1.1 | | | |
| 방법(3) | DT871 | | 0.34 | | 0.37 | 0.73 | 1.16 | 1.17 | 2.01 | 2.81 | 0.80 | |
| | DT892 | | 0.38 | | 0.59 | 0.99 | 1.47 | 2.06 | 3.2 | 0.69 | | |
| 방법(4) | DT871 | | 0.54 | | 1.10 | 2.00 | 3.64 | 2.12 | | | | |
| | DT892 | | 0.34 | | 0.37 | 0.73 | 1.16 | 1.17 | 2.01 | 2.81 | 0.80 | |



그림(4) 관측수문곡선(DT871)과 계산수문곡선의 비교



그림(5) 관측수문곡선(DT892)과 계산수문곡선의 비교