

운동과 이론을 이용한 지형학적 순간단위도의 유도

Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph

Based on Kinematic Wave Theory

○박해님*, 조원철**, 허준행***

1. 서론

수공구조물의 설계에 있어서 강우로부터 침투홍수량과 유량수문곡선을 예측하는 방법은 1930년대 초기부터 꾸준히 연구되어 왔으며 이를 위해 비교적 많이 쓰이는 방법 중의 하나가 단위유량도법이다. 자연상태 하에서는 단위유량도법의 가정이 모두 만족될 수 없으나 사용되는 수문자료들이 이 조건에 부합되도록 신중히 검토된 후에 선택된다면 실제 목적을 위하여 단위유량도의 결과들은 일반적으로 받아들일 수 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 순간단위유량도를 구하기 위해 Horton-Strahler의 하천 차수 법칙과 지형학적 인자의 개념을 이용하여 도달시간 확률분포형의 회선적분(convolutional integral) 형태인 순간단위도를 유도한다. 그러나 실제 지형학적 인자를 고려한 단위유량도를 유도해냄에 있어서 가장 중요한 것은 유하시간의 문제인데 이는 유역의 수리학적 문제와 깊이 연관되어 있다. 따라서 본 연구에서는 하천 차수법칙에 기반하여 지표면과 수로상의 도달시간을 해석적으로 결정하기 위해 운동과 이론을 도입하였다. 그리고 순간단위도 적용을 위한 도달시간의 확률분포형 선정에 있어서 Weibull 분포형을 선정하여 형상 매개변수별로 비교, 검토하였다. 또한 본 연구에서는 내상유역에 대해 본 모형에서 산정된 유출수문곡선과 실측치를 비교함으로써 적정 매개변수를 추정하여 실제 유역에의 적용성을 논하고자 한다.

2. 기본이론

2.1 운동과 이론을 이용한 유하시간의 추정

Strahler(1950)의 하천 차수법칙에 따른 i 차 소유역은 개념적으로 지표흐름을 나타내는 동일한 두

* 연세대학교 토목공학과 박사과정

** 연세대학교 토목공학과 교 수

*** 연세대학교 토목공학과 부 교 수

개의 직사각형 평면과 동일경사의 수로로 단순화할 수 있다. 이 개념적인 모형으로부터 평형상태에 있는 지표유량과 수심의 관계에 의해 i 차 지표평면의 유하시간을 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{x_o} = \left(\frac{n_o \bar{L}_o}{\bar{S}_o^{1/2} q_L^{m-1}} \right)^{1/m} \quad (1)$$

여기서, T_{x_o} 는 i 차 지표평면의 유하시간, n_o 는 지표 흐름평면의 유효조도계수(Engman, 1986; Hydrologic Engineering Center, 1990), \bar{L}_o 는 i 차 지표흐름평면의 평균 길이, \bar{S}_o 는 i 차 평균 지표흐름 경사, q_L 은 흐름의 자유표면에서 지표나 강우로부터의 유입률, 혹은 침투 등에 의한 유출율을 나타내며(Yen, 1986), 상수 m 은 Manning의 공식에서와 같이 5/3으로 나타내어 질 수 있다.

유량과 수심의 평형관계에 의해 i 차 수로에 대해 유하시간은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Wooding, 1965).

$$T_x = \frac{B_i}{2q_L \bar{L}_o} \left[\left(h_{co}^m + \frac{2q_L n_c \bar{L}_o \bar{L}_c}{B_i \bar{S}_c^{1/2}} \right) - h_{co} \right] \quad (2)$$

여기서, B_i 는 i 차 하천의 수로 폭, n_c 는 수로의 유효조도계수, \bar{L}_c 는 i 차 소유역의 평균 수로길이, \bar{S}_c 는 i 차 수로의 평균 경사, h_{co} 는 i 차 수로입구에서의 수심이며 다음 식 (3)과 같이 주어진다.

$$h_{co} = \left[\frac{q_L n_c (N_i \bar{A}_i - AP_{OA_i})}{N_i B_i \bar{S}_c^{1/2}} \right]^{1/m} \quad (3)$$

이와 같이 제시된 식에 의해 여러 가지 다른 차수의 소유역 유하시간을 특정유역에 국한된 경험공식으로부터가 아니라 지표면과 수로의 수리학적 특성으로부터 해석적으로 얻을 수 있다.

2.2 지형학적 순간단위유량도의 구조

초과강우의 단위 깊이가 순간적으로 유역에 균등하게 배분되고 단위 초과강우는 상호 독립적인 무수한 빗방울로 이루어져 있다고 가정한다면, Strahler(1950)의 하천 차수법칙에 근거하여 Ω 차 유역은 여러 가지 부분들로 나누어 질 수 있다. i 차 지표면은 x_o , i 차 수로는 x_i 와 같이 나타낼 수 있다. 지표면에 떨어진 각각의 빗방울 입자는 낮은 차수에서 높은 차수로 수로를 따라 하천 유출구에 도달한다. w 가 $x_o \rightarrow x_i \rightarrow x_j \rightarrow \dots \rightarrow x_\Omega$ 와 같은 특정한 경로를 나타낸다고 하면 빗방울 입자가 이 경로를 따를 확률은 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(w) = P_{OA_i} \cdot P_{x_o, x_i} \cdots P_{x_i, x_j} \cdots P_{x_j, x_\Omega} \quad (4)$$

여기서, P_{x_o, x_i} 는 빗방울 입자가 i 차 지표면에서 i 차 수로로 유입되는 천이확률, P_{x_i, x_j} 는 빗방울 입자가 i 차 수로에서 j 차 수로로 유입될 천이확률, P_{OA_i} 는 총 유역면적에 대한 i 차 유역의 지표면적의 비이다.

실제 지형학적으로 복잡한 유역인 경우에는 어떤 차수에 해당하는 유하시간을 단일 평균값으로 나타내기보다는 확률밀도함수의 형태로 나타내는 것이 더 적합하다. 만약 서로 다른 단계의 유하시

간이 확률적으로 상호독립적이며 $f_{x_k}(t)$ 는 x_k 단계에서 유하시간의 확률밀도함수를 의미하고 평균치로서 2.1절에서 주어진 유하시간 T_{x_k} 를 가진다고 가정하면, 빗방울이 t 시간 이내에 전 경로를 따라 유하할 확률에 대해 시간과 유역의 저류량의 연속관계를 고려하여 얻은 지형학적으로 순간단위유량도의 종거는 다음 식 (5)와 같다.

$$u(t) = \sum_{w \in W} [f_{x_1}(t) * f_{x_2}(t) * f_{x_3}(t) * \dots * f_{x_n}(t)]_w \cdot P(w) \quad (5)$$

여기서, *는 회선적분을 의미한다.

2.3 도달시간의 확률분포형

유역으로부터 적절한 순간단위유량도를 유도해내기 위해서는 식 (5)에서 제시한 도달시간의 확률분포형을 적절히 선택해야 한다. Gupta 등(1980)은 도달시간의 적정 확률 분포형을 각각 지수분포형과 등분포형으로 가정하여 순간단위도를 유도하였다. 지수분포형의 도달시간은 선형저수지 유역개념으로부터 가정되었고 등분포형의 도달시간은 선형수로의 개념으로부터 가정되었다. 배수유역은 비선형적인 수문학적 반응을 하므로 도달시간을 지수분포형으로 가정한 경우에는 대체로 침투부와 도달시간의 정도가 약간 과소하게 평가된다. 등분포형으로 가정된 도달시간의 경우에는 물리적인 의미를 갖지 못하며 해석적으로 해를 얻기가 어렵다. 또한 Lee 등(1997)은 도달시간의 분포형을 산정하는데 있어서 임의 상태의 도달시간을 유역의 저류요소에 관련된 부분과 수로의 천이요소에 관련된 부분으로 구분하여 각각 지수분포형과 등분포형을 가정하였다. 이와 같은 방법은 각 차수별로 등분포형의 불연속성에 의거하여 해석적으로는 해를 얻을 수 없으며 수학적으로 유도하여 얻은 식의 경우 계수의 산정이 용이하지 않다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 순간단위유량도의 적용성 향상을 위해 도달시간의 확률분포형을 Weibull 분포형으로 가정하였으며 형상 매개변수의 변화에 따라 식 (5)에 의해 지형학적 순간단위유량도를 유도하였다.

3. 적용예

운동과 이론에 의한 지형학적 순간단위유량도의 적용성을 검토하기 위해서 국제수문계획(IHP) 시범유역인 평창강 수계의 3개 수위관측점에 대한 배수유역을 대상유역으로 선정하였다. 평창강 대표유역은 강원도 평창군에 위치하고 있으며 유역면적은 523.11km², 최장유로연장은 51.85km, 평균유로경사는 0.07450인 하천유역이다. 이 대상유역은 수위관측지점에 따라 6개의 소유역으로 구분되며 본 연구에서 선정한 소유역은 장평교, 백옥포 및 상안미지점에 해당하는 소유역으로 표 1~표 4에 각 대상유역의 특성인자 및 지형학적 인자를 나타내었다.

표 1. 대상유역의 특성인자

유역	유역면적(km ²)	유로연장(km)	평균유로경사	하천차수
평창강(장 평)	103.55	25.95	0.12476	4
평창강(백옥포)	142.26	22.95	0.11585	5
평창강(상안미)	389.51	44.20	0.08097	5

표 2. 장평유역의 지형학적 인자

지형학인자 \ 하천차수	1	2	3	4
하천수	95	22	4	1
하천평균길이(km)	0.701	1.149	2.815	19.780
하천평균경사	0.1586	0.0907	0.0363	0.0099
하천평균면적(km ²)	0.586	3.40	21.539	103.553

표 3. 백옥포유역의 지형학적 인자

지형학인자 \ 하천차수	1	2	3	4	5
하천수	100	28	7	2	1
하천평균길이(km)	0.711	1.626	2.283	7.310	6.850
하천평균경사	0.1551	0.0859	0.0262	0.0156	0.0058
하천평균면적(km ²)	0.678	3.881	17.661	68.286	142.262

표 4. 상안미유역의 지형학적 인자

지형학인자 \ 하천차수	1	2	3	4	5
하천수	304	82	17	4	1
하천평균길이(km)	0.735	1.342	2.617	11.316	27.530
하천평균경사	0.1595	0.0939	0.0332	0.0139	0.0060
하천평균면적(km ²)	0.645	3.468	19.384	92.120	389.512

평창강유역의 강우-유출 자료는 국제수문계획 연구보고서에서 수록된 자료를 사용하였다. 본 연구에서 모의한 결과와 비교하기 위해 실측치로써 주어지는 강우량과 유출량의 관측치는 표 5와 같다.

표 5. 대상유역의 강우량과 유출량 관측치

대상유역	강우사상일	총강우량 (mm)	강우지속기간 (hr)	첨두유출량 (m ³ /sec)
백옥포	1985. 7.10	110.41	13	161.12
상안미	1985. 7.12	51.69	22	162.70

그림 1에는 지수분포와 Weibull 분포로 가정된 도달시간에 대한 장평유역의 순간단위유량도를 나타내었으며 Weibull 분포인 경우 형상 매개변수는 2로 가정하였다. 도달시간의 확률분포형을 지수분포로 가정한 경우는 Weibull 분포(형상 매개변수 > 1.0)로 가정한 경우보다 첨두치는 작고 첨두도달시간은 짧은 것으로 나타났다. 그림 2에는 장평유역에 대한 Weibull 분포의 형상매개변수별

순간단위유량도를 나타내었으며, 그 결과 순간단위유량도의 종거 또한 형상매개변수의 특징을 그대로 반영하고 있음을 알 수 있다.

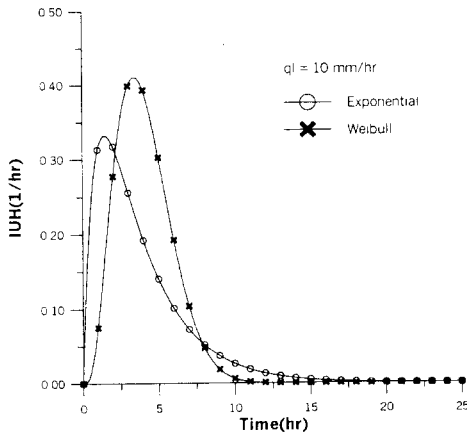


그림 1. 확률분포형에 따른 장평유역의 순간단위유량도

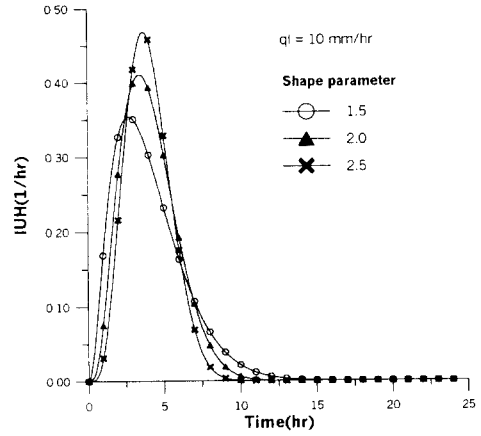


그림 2. 형상 매개변수에 따른 장평유역의 순간단위유량도

Weibull 분포형으로 가정된 도달시간의 형상매개변수를 변화시키면서 유도한 수문곡선과 백옥포와 상안미의 실측치를 비교한 결과는 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 형상매개변수의 변화에 따른 수문곡선은 침투치 도달이전에 약간의 차이를 보일 뿐 하강부에서는 거의 동일한 종거를 보였다. 따라서 본 연구의 대상유역에 대해 도달시간의 Weibull 분포 가정은 높은 적용성을 가짐을 알 수 있다.

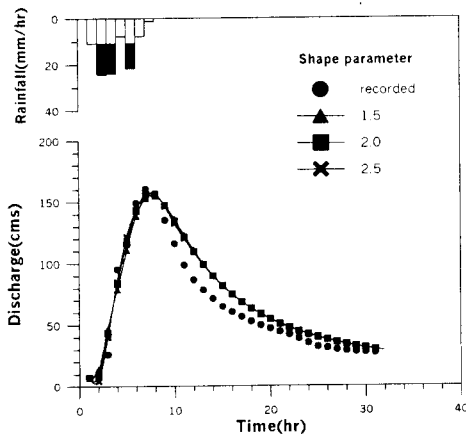


그림 3. 형상매개변수별 모의 결과와 실측치의 비교(백옥포유역)

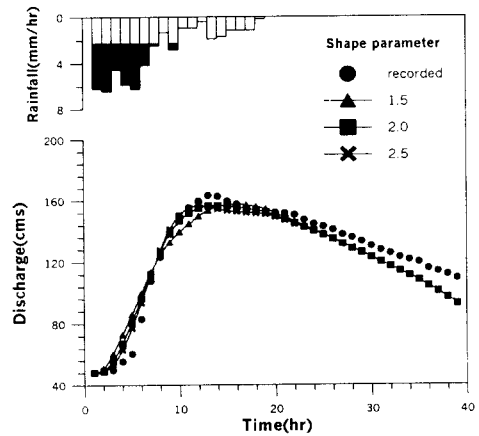


그림 4. 형상매개변수별 모의 결과와 실측치의 비교(상안미유역)

4. 결론

본 연구에서는 하천차수를 고려한 운동과 이론에 기반하여 빗방울 입자의 유출경로별로 도달시간을 산정하고 이에 대한 확률분포형을 가정하여 순간단위유량도를 유도하고 합성하였으며, 대상구역의 실측자료와 본 연구방법을 비교해 본 결과 비교적 일치함을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 유하시간 확률분포형의 회선적분으로 유도되는 순간단위유량도 역시 형상 매개변수에 대한 분포형의 특성을 잘 반영하는 것을 알 수 있었다.
- (2) 대상구역의 일련의 호우사상에 대해 모의한 결과 도달시간의 확률분포형을 형상매개변수가 1.5인 Weibull 분포로 가정한 경우에 적용성이 높게 나타났다.
- (3) 전체 유역에 대한 총 유출수문곡선을 모의한 결과 1.5~2.5 범위의 형상 매개변수에 의한 영향은 크게 작용하지 않음을 알 수 있었다.

참고문헌

- 건설부. (1987). *국제수문개발계획(IHP) 대표시험유역 연구조사 보고서*
- Engman, E. T. (1986). "Roughness coefficients for routing surface runoff.", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 1, pp. 39-53.
- Gupta, V. K., Waymire, E., and Wang, C. T. (1980). "A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology.", *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 5, pp. 855-862.
- Hydrologic Engineering Center. (1990). *HEC-1 flood hydrograph package: User's manual*, U.S. Army Corps of Engineers HEC, Davis, California.
- Lee, K. T. and Yen, B. C. (1997). "Geomorphology and kinematic-wave-base hydrograph derivation.", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 1, pp. 73-80.
- Strahler, A. N. (1950). "Equilibrium theory of erosional slope approached by frequency distribution analysis.", *Am. Journal of Science*, Vol. 248, pp. 673-696.
- Yen, B. C. (1986). "Rainfall-runoff process on urban catchments and its modeling.", *Urban Drainage Modelling*, Maksimovic and Radojkovic, eds., Pergamon Press, Oxford, U. K.
- Yen, B. C. and Lee, K. T. (1997). "Unit hydrograph derivation for ungauged watersheds by stream-order laws.", *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 2, No. 1, pp. 1-9.
- Wooding, R. A. (1965). "A hydraulic model for the catchment-stream problem.", *Journal of Hydrology*, Vol. 3, pp. 254-267.