

운동파 지표면유출을 고려한 홍수추적 모형

O박상우¹⁾, 전병호²⁾, 장석환³⁾, 오경두²⁾

1. 서론

인류는 인접한 하천에 부존하는 수자원으로부터 많은 혜택을 받고 있으나 때로는 홍수로 인하여 심각한 인명과 재산의 피해를 입기도 한다. 최근에는 이러한 홍수피해가 세계적 기상이변과 더불어 그 빈도와 규모가 날로 증가하고 있으며, 이로 인해 홍수피해를 감소 내지 방지하기 위한 공학적 수단의 하나인 강우-유출 모형이나 홍수추적기법은 홍수유출 모의시 보다 정확한 산정결과를 요구하고 있다.

주어진 강우사상에 대한 강우-유출의 모의는 지표면유출, 하천유출 그리고 지하수유출 등 세 가지 유출 모의를 동시에 수행하여야 하며, 이 중 지표면유출과 하천유출은 지표수로 볼 수 있다. 지표면유출은 강우-유출 중에서 많은 부분을 차지하며 강우시 단기간에 하천으로의 유입을 통해 하천 유량과 수위를 급증시킨다. 반면에 지하수유출은 지표면유출과 달리 직접유출이 끝난 후에도 장기간 계속 나타나며 집중호우시 지표면유출과 반대로 단기간에는 하천유량과 수위에 미치는 영향을 거의 판별할 수 없다. 따라서 강우시 단기간의 홍수유출사상을 모의할 때는 이상 세 가지 유출사상 중 적어도 지표면유출과 하천유출의 두 가지 사상을 종합적으로 고려하여 적절하게 연계하여야 한다.

지금까지 유출사상을 모의하는 수치모형은 세계적으로 여러 종류가 개발되었으며, 그 중 하천 해석프로그램인 HEC-RAS(1997)는 하천 상류의 유입곡선과 하류의 유출곡선을 경계조건으로 사용하며 대하천과 같이 잘 정비된 하천과 수로에서의 적용에는 큰 문제점이 없으나 중소하천과 같이 정비가 불량한 자연하천에 대해서는 사행성을 충분히 고려해 줄 수 없다는 단점을 갖고 있다. 또한 널리 상용화되고 있는 수문해석 프로그램인 HEC-HMS(1997)는 기존 미공병단에서 개발한 HEC-1(1990)을 개선시킨 프로그램으로 지표면유출과 하천유출을 연계하여 각 유역 출구지점에서의 유출수문곡선을 제공해 주나, 지표면유출이 하천유출 해석시 유입경계조건으로만 사용되고 측방유입량으로는 고려되지 않아 홍수시 중소하천과 같이 측방으로 유입되는 지표면유출에 의해 하천 유량과 수위가 급변하는 유역에서는 적합한 결과를 나타내지 못한다.

본 연구에서는 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 수리학적 하도추적 모형인 Muskingum-Cunge 모형에 운동파(kinematic wave) 모형의 지표면유출을 측방유입량으로 하여 하도구간별 유출량을 예측할 수 있는 홍수추적 모형을 개발하고자 하였다.

2. 홍수추적 이론

2.1 지배방정식

개수로의 1차원 점변 부정부등류(gradually varied unsteady nonuniform flow)를 지배하는 공식은 연속방정식과 운동량방정식으로 구성되는 Saint-Venant식이라고 하겠다.

선형 하도의 입의 구간에서 질량보존의 법칙을 이용하면 유입량과 유출량의 차이는 저류량의 시간적 변화율과 같게 되는 연속방정식으로 표현된다. 또한 이 구간에 작용하는 모든 힘의 합은 운동량의 변화율과 같게 되므로 Newton의 제 2법칙에 의하여 운동량방정식으로 표현된다.

$$\text{연속방정식 : } \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{1}$$

$$\text{운동량방정식: } \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = Ag \left(S - \frac{\partial y}{\partial x} - S_f \right) + qv_x \tag{2}$$

여기서, A 는 하천의 통수단면적, Q 는 유량, g 는 중력가속도, S 는 하상경사, $\partial y/\partial x$ 는 수면경사, S_f 는 마찰경사, q 는 하천의 단위길이당 측방유입량, v_x 는 측방유입량의 x 방향 유속이다.

2.2 하도추적 모형

자연하천 흐름에서는 중력과 마찰력이 지배적인 힘이다. 따라서 식 (2)에서 관성에 의한 가속항 $\left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) \right]$, 압력항 $(\partial y/\partial x)$ 과 측방유입량에 의한 운동량의 변화 (qv_x) 를 무시하면 다음과 같이 간단히 된다.

1) 서남대학교 토목공학과 부교수 2) 육군사관학교 토목공학과 교수 3) 대전대학교 토목공학과 부교수

$$S = S_f \quad (3)$$

식 (3)은 하상경사와 마찰경사가 평형을 이루는 등류이며, 유량을 단면적 A 의 함수($Q = \alpha A^\beta$)로 나타내고 이를 A 에 관하여 미분하면 식 (4)가 된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial A} = \beta \frac{Q}{A} = \beta v = \omega \quad (4)$$

여기서, v 는 평균유속, ω 는 운동파의 대류속도(convection speed)이다.

그리고 식 (4)의 $\partial Q/\partial A$ 를 식 (1)의 양변에 곱하여 정리하면 다음과 같은 운동파 모형을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \omega \frac{\partial A}{\partial x} = \omega q \quad (5)$$

한편, 자연하천의 흐름이 부정류이면 확산(diffusion)이 존재하며, 이를 고려하기 위해서 식 (2)에서 관성에 의한 가속항과 측방유입량에 의한 운동량의 변화를 무시하면 다음과 같이 확산과 모형의 운동량방정식이 된다.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S - S_f \quad (6)$$

운동파와 확산과의 차이점은 $\partial y/\partial x$ 의 유무이며, $\partial y/\partial x$ 개수로의 부정류에 존재하는 자연적인 확산 과정을 나타낸다. 그리고 식 (1)과 (6)은 정상부동류를 기술하는 두 편미분방정식이며, 측방유입량 q 가 하도를 따라 일정하게 들어온다고 가정하면 이들 두 식은 Q 를 종속변수로 하는 하나의 식으로 유도된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \omega \frac{\partial Q}{\partial x} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \omega q \quad (7)$$

여기서, $D = Q/2BS$ 이고, D 를 수리확산계수라 하며, B 는 수로폭이다.

2.3 Muskingum-Cunge 모형

Muskingum-Cunge 모형은 추적매개변수의 계산을 통하여 운동파에 근거한 Muskingum 모형을 수문곡선의 감쇠(attenuation)와 측방유입량을 고려할 수 있도록 식 (8)과 같이 수정한 확산유사모형이다.

$$Q_{i+1}^{n+1} = C_1 Q_i^{n+1} + C_2 Q_i^n + C_3 Q_{i-1}^n + C_4 \quad (8)$$

여기서, $C_1 = \frac{\Delta t - 2K\varepsilon}{2K(1-\varepsilon) + \Delta t}$, $C_2 = \frac{\Delta t + 2K\varepsilon}{2K(1-\varepsilon) + \Delta t}$, $C_3 = \frac{2K(1-\varepsilon) - \Delta t}{2K(1-\varepsilon) + \Delta t}$, $C_4 = \frac{\bar{q}\Delta x \cdot \Delta t}{2K(1-\varepsilon) + \Delta t}$ 이고, K 는 시간의 차원을 갖는 저류상수, ε 는 저류량에 대한 유입량과 유출량의 상대적 중요도를 나타내는 가중인자 ($0 < \varepsilon < 0.5$)로써 각각 다음 식으로 계산된다.

$$K = \frac{\Delta x}{\omega}, \quad \varepsilon = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\bar{Q}}{BS\omega\Delta x} \right) \quad (9)$$

여기서, ω 는 \bar{Q} 에 해당하는 운동파 대류속도, \bar{Q} 는 기준유량, B 는 \bar{Q} 와 연관된 수면폭이고, $\bar{q} = (q_{i+1}^n + q_{i-1}^n)/2$ 이다.

식 (8)의 유한차분식은 4점 음해법(4-point implicit method)으로 공간미분은 중앙화하고, 시간미분은 가중인자 ε 을 이용하여 비중앙화함으로써 식 (10)와 같이 구성된다.

$$\frac{\varepsilon(Q_{i+1}^{n+1} - Q_i^n) + (1-\varepsilon)(Q_{i-1}^{n+1} - Q_{i-1}^n)}{\Delta t} + \frac{\omega}{2} \frac{(Q_{i+1}^n - Q_i^n) + (Q_{i+1}^{n+1} - Q_{i-1}^{n+1})}{\Delta x} = \omega \frac{q_{i+1}^n + q_{i-1}^n}{2} \quad (10)$$

2.4 지표면유출 모형

지표면유출은 강우에 대한 유역의 동역학적 반응으로써 일반적으로 수심이 얇은 박류(sheet flow) 또는 실개천 흐름(flow over rilled surface)의 형태를 이룬다. 강우량 $P(l, t)$ 로 인한 지표면유출이 사면거리 L_0 , 경사 S_0 인 지표면을 흘러 하천의 단위길이당 측방유입량

$q(t)$ 로 되는 과정을 도식적으로 나타내면 그림1과 같다. 그림 1의 지표면 유출과정은 운동파로 해석할 수 있으며, 식 (1)의 연속방정식을 단위길이에 대하여 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial l} = P_e(l, t) \quad (11)$$

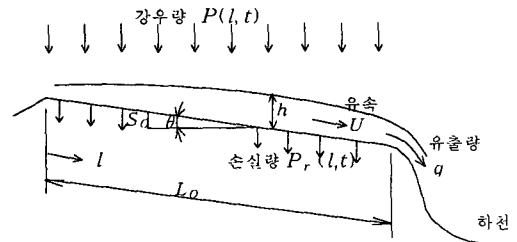


그림 1. 강우에 의한 지표유출

여기서, $P_e(l,t)$ 는 강우에 의한 유입량으로써 총강우량 $P(l,t)$ 에서 손실량 $P_r(l,t)$ 를 뺀 유효강우량이 된다.

또한, 지표면유출은 중력과 마찰력에 의해 지배되므로 식 (2)의 운동량방정식은 식 (3)과 같이 되며, 식 (3)에 Manning의 공식을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$q(t) = ah^\beta \quad (12)$$

여기서, $a = \frac{1}{n} S_0^{1/2}$, $\beta = 5/3$ 이 되고, h 는 지표면유출의 수심, n 은 지표면의 조도계수이다.

식 (12)를 식(13)과 같이 h 에 관하여 미분하고, 이를 식(11)에 적용하면 식 (14)와 같이 수심 h 를 독립 변수로 하는 지표면유출의 운동과 모형이 된다.

$$\frac{\partial q}{\partial h} = a\beta h^{\beta-1} = \beta U = \omega_s \quad (13)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \omega_s \frac{\partial h}{\partial l} = P_e(l,t) \quad (14)$$

여기서, U 는 지표면유출의 유속이고, ω_s 는 지표면 운동과의 전파속도으로써 $\omega_s = dl/dt$ 와 같다.

식 (14)는 ω_s 를 고려할 때 전미분과 같으므로 강우에 의한 유입량이 일정 [$P_e(l,t) = P_e$] 하다고 생각하면 식 (15)가 되고, 이를 식 (12)에 대입하면 유출량 $q(t)$ 를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = P_e \quad \text{또는} \quad h = P_e \cdot t \quad (15)$$

$$q(t) = U \cdot h = a(P_e \cdot t)^\beta \quad (16)$$

식 (16)은 유효강우량 P_e 에 의한 지표면 유출수문곡선의 상승부를 나타내 준다. 그리고 P_e 가 일정하게 지속되어 지표면의 도달시간 t_c 이후의 유출량은 평형상태가 되어 $q(t) = P_e \cdot L_0$ 로 일정해진다. 지표면의 도달시간은 식 (13)을 ω_s 에 대하여 식 (17)과 같이 바꾸어 쓰고 이를 적분하면 식 (18)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{dl}{dt} = a\beta h^{\beta-1} = a\beta (P_e \cdot t)^{\beta-1} \quad \text{또는} \quad \int_0^{L_0} dl = \int_0^{t_c} a\beta (P_e \cdot t)^{\beta-1} dt \quad (17)$$

$$t_c = \left(\frac{L_0}{aP_e^{\beta-1}} \right)^{1/\beta} \quad (18)$$

또한, 강우지속기간 t_r 이 도달시간 t_c 보다 길 경우 t_r 시간까지는 $q(t_c)$ 의 평형상태를 유지하고, t_r 시간 이후에는 유입량이 없으므로 지표면 유출수문곡선은 평형상태로부터 지속적으로 감소하게 되며, Woolhiser (1975)는 이를 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$q(t) = P_e \cdot L_0 - P_e \beta a^{\frac{1}{\beta}} q^{\frac{\beta-1}{\beta}} (t-t_r) \quad (19)$$

한편, 강우지속기간 t_r 이 도달시간 t_c 보다 짧을 경우에는 시간구간 $t \leq t_r$ 에서는 유출수문곡선이 상승부를 이루나, 시간구간 $t_r \leq t \leq t_x$ 에서는 $q(t_r)$ 의 부분 평형상태(partial equilibrium), 시간구간 $t_x < t$ 에서는 식 (19)와 같이 하강부를 이룬다. 이때 시점 t_x 는 식 (20)과 같이 된다.

$$t_x = t_r + \frac{L_0(P_e \cdot t_r)^{1-\beta}}{a\beta} - \frac{t_r}{\beta} \quad (20)$$

강우가 계속됨에 따라 지속기간 t_r 의 강우가 연속해서 발생할 경우 도달시간 t_c 는 식 (18)에서와 같이 각 지속기간의 유효강우량 P_e 의 크기에 따라 바뀌게 되므로, 각 지속기간에 대한 지표면 유출수문곡선은 식 (16)과 (19)로 계산된다. 이때 총 유출수문곡선은 단위도 모형의 적용시와 같이 중첩 및 지체원리에 따라 합성되며, 이렇게 구성된 총유출수문곡선은 수리학적 홍수추적 모형의 측방유입량으로 이용할 수 있다.

3. 모형의 적용

본 연구의 홍수추적 모형을 적용하기 위하여 국제수문개발계획 (IHP)의 대표유역인 남한강 수계, 평창강 유역을 선정하였으며, 상류 백옥포지점의 유량을 본류 유입량으로 하고 백옥포지점의 직하류에서 합류하는 장평지점의 유량을 지류유입량으로 하여 상안미지점에 대한 홍수추적을 실시하였다. 백옥포지점과 상안미지점 사이의 유역은 면적이 144.80km²이고, 유역평균경사가 0.2581로써 매우 급한 경사를 이루고 있으며, 유로연장과 유로의 평균폭이 각각 20.30km 및 82m이며, 하도의 평균경사는 0.00591이다.

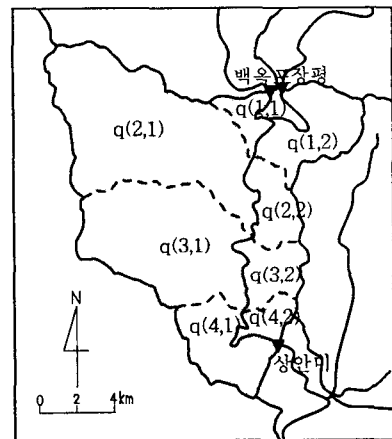


그림 2. 상안미유역의 소유역 분할도

본 연구에서는 지표면유출의 계산과 하도추적을 위하여 백옥포지점과 상안미지점 사이의 유역을 그림 2와 같이 하도를 4등분하고($\Delta x = 5075m$), 하도를 경계로 다시 2분하여 8개의 소유역으로 나누었으며, 각 소유역의 면적, 평균 지표경사 및 사면거리는 표 1과 같다. 이때 지표면의 평균 조도계수 n 은 토지의 이용상태와 토양종류별 면적, HEC-1(1990)에서 제시한 값을 이용하여 0.36으로 결정하였다. 또한 백옥포지점과 상안미지점 사이의 유역에 영향을 미치는 8개 우량관측소의 강우자료로부터 유역 평균강우량을 산정하였으며, 유역우량의 산정은 SCS방법의 AMC-III조건을 이용하였다.

본 연구에서 분석된 강우-유출사상은 관측정도가 비교적 양호한 4개의 홍수사상이었으며, 그 예측결과는 그림 3 및 표 2와 같다. 분석에 있어서 이용된 하도추적의 시간증분 Δt 는 약 740sec이었으며, 홍수파의 대류속도 ω 는 전체 하도길이 L 에 대한 침투유량의 유하시간(travel time) T_p 를 구함으로써 계산할 수 있는데 4개 홍수사상 중 2번 홍수사상은 5.64m/sec, 나머지 3개 사상은 2.82m/sec이었다. 한편, 측방유입량으로 이용되는 지표면 유출량의 계산은 강우지속시간 t_r 을 하도추적에서의 동일하게 720sec(0.2hr)로 하고, 지표면의 도달시간 t_c 를 유역강우량 P_e 에 따라 식 (18)로부터 구하여 식 (16) 및 (19)를 이용하여 산정하였다.

표 1. 각 소유역별 면적, 지표경사, 사면거리

유역	면적(km ²)	지표경사	사면거리(m)
q(1,1)	4.31	0.2283	871.11
q(2,1)	50.20	0.2109	10109.22
q(3,1)	38.64	0.2675	7881.49
q(4,1)	13.61	0.2986	2798.77
q(1,2)	16.91	0.2524	3436.52
q(2,2)	8.25	0.3635	1729.69
q(3,2)	8.30	0.3325	1723.51
q(4,2)	4.59	0.3001	944.28

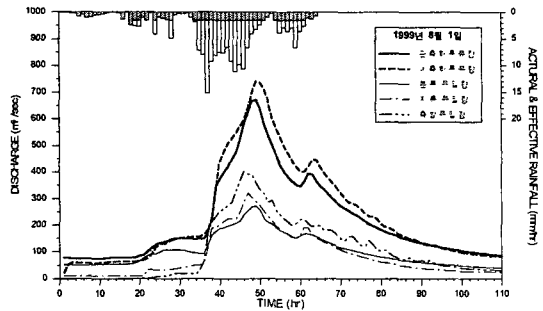


그림 3. 1999년 8월 1일 홍수의 추적결과

표 2. 유입 및 유출수문곡선의 침투비교

호우사상	유입수문곡선						유출수문곡선				
	본류		지류		측방		예측		관측		
번호	발생일시	침투유량(m ³ /sec)	발생시간(hr)	침투유량(m ³ /sec)	발생시간(hr)	침투유량(m ³ /sec)	발생시간(hr)	침투유량(m ³ /sec)	발생시간(hr)	침투유량(m ³ /sec)	발생시간(hr)
1	1990.6.20	425.05	23	266.40	23	281.02	23.19	796.82	25.12	851.72	24.69
2	1998.7.8	227.12	47	114.92	46	179.40	48.00	378.35	47.80	336.87	47.60
3	1998.8.14	149.68	16	94.20	16	174.04	13.93	306.22	17.77	274.23	17.77
4	1999.8.1	271.60	49	321.04	47	401.37	46.25	740.96	49.33	667.43	48.72

4. 결론

본 연구에서는 강우-유출과정에 있어서 강우에 의한 지표면유출의 기여가 큰 중소하천 유역의 단기간 홍수유출을 보다 효율적이고 정확하게 예측하기 위하여 지표면유출을 하도의 측방유입량으로 이용할 수 있는 홍수추적 모형을 개발하고자 하였다.

이를 위하여 수리학적 확산과 모형인 Muskingum-Cunge 모형과 운동파 모형의 지표면유출을 측방유입량으로 하는 홍수추적 모형을 구축하였으며, 이를 평장강 유역에 적용하여 본 결과 침투유량은 약간의 오차를 보였으나, 침투 발생시간은 매우 정확하게 예측되었으며 예측수문곡선의 상승부와 하강부를 비롯한 전반적인 양상이 관측수문곡선과 잘 부합하고 있었다. 이것은 측방유입량 모형이 강우량의 파형 변화에 의한 지표면유출의 변화를 효율적으로 모형화하기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 측방유입량을 고려한 모형은 강우규모가 클수록 그리고 강우강도의 변화가 심할수록 예측수문곡선에 많은 영향을 주고 있어 유역의 도달시간이 짧은 산지 하천유역에서 홍수추적의 정확도를 높이는 데 크게 기여할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- 선우중호 (1983). 수문학, 동명사.
- 윤태훈 (1997). 응용수문학, 청문각.
- 유동훈, 이정영 (2001). "지표면-하천 유출의 연계 수치모형", 한국수자원학회논문집, 34(1), pp.91~103.
- Natural Environment Research Council (1975). Flood Studies Report, vol. III, Flood routing studies, London, England.
- Woolhiser D. A. (1975). "Simulation of Unsteady Overland Flow", Unsteady Flow in Open Channels, Water Resources Publications, pp.485~505, 1975.