

지표면-하천 유출의 연계 수치모형

유 동훈* 이 정영**

1. 서론

강우유출은 지표면유출, 하천유출, 복류수유출, 지하수유출로 구성되며 이 중 지표면유출과 하천유출은 지표수로 볼 수 있다. 지표면유출은 강우유출 중에서 많은 부분을 차지하며 강우시 하천으로의 유입을 통해 하천유량의 증가와 수위를 상승시킨다. 반면 지하수 유출은 지표면 유출과는 다르게 직접유출이 끝난 후에도 계속 나타나며 집중호우시 지표면 유출과는 반대로 하천유량과 수위에 거의 영향을 미치지 않는다. 이와 같이 강우시 지표면 유출은 하천수위에 많은 영향을 미치기 때문에 각 유역별 수문곡선 작성은 시간별 하천으로의 유입량 산정에 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 기존 하천 해석프로그램인 HEC-RAS는 하천 상류의 유입곡선과 하류의 유출곡선을 경계조건으로 사용하며 대하천과 같이 잘 정비된 하천과 수로의 적용에는 적합하나 반면에 중소하천과 같이 잘 정비가 되지 않은 자연형 하천에 적용하기에는 문제점이 많다. 또한 홍수시 중소하천은 하천으로 유입되는 지표면 유출에 의해 하천 수위가 급상승 하기 때문에 측방유입량의 고려가 필요하다.

세계적으로 널리 상용화 되고 있는 수문해석프로그램인 HEC-HMS는 기존 미공병단에서 개발한 HEC-1을 개선시킨 프로그램으로 지표면유출과 하천유출을 연계하여 각 유역출구 지점에서의 유출수문곡선을 작성하는 프로그램이다. 지표면유출은 하천유출 해석시 유입경계조건으로 사용되며 수문학적 홍수추적 기법을 사용하여 하천유출을 해석하였다. 반면 소유역으로 부터의 측방유입량을 고려하지 않아 하천 각 지점에서의 유량과 수위 산정에 적합한 결과를 나타내지 못하며, 기존 관측자료를 통해 하천 매개변수의 추정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하고자 지표면 유출과 하천유출을 실시간별로 연계하여 유역의 각 지점에서의 유출수문곡선과 하천 각 지점에서의 유량과 수위 변화를 예측하였다.

2. 지표면-하천 연계모형

2.1 지표면 유출

기존 유출모형인 [RRL], [ILLUDAS], [SWMM]모형은 지표면유출 산정시 유역면적의 크기에 제한이 있는 단점이 있어 본 연구에서는 유역면적의 크기에 따른 유역계수와 수문곡선의 형상에 따른 형상계수를 도입하여 침투유량을 산정하였다.

* 아주대학교 환경도시공학부 교수

** 아주대학교 건설교통공학과 석사과정

합리식의 형태로 나타낸 홍수유출량 산정식은 식(1)이며 $I=f=CI$ 로 표기하고 형상계수 f_s 와 평균을 f_A 를 도입하면

$$Q_p = f_s \cdot f_A \cdot CIA \quad (1)$$

이다. 여기서 f_s 는 형상계수이며, f_A 는 지점우량 대비 면적우량 백분율이다. 본 연구에서는 수문곡선형상으로 그림 1에 제시된 SCS 단일 삼각형법과 이중 삼각형법 및 Nakayasu Method에 내포된 곡선형상을 고려하여 형상계수의 추정식을 개발하였으며, 이로부터 추정된 형상계수 f_s 의 산정식은 표 1에 제시된 바와 같다.

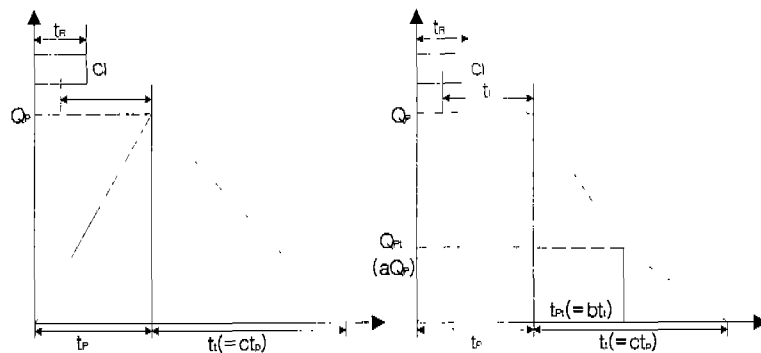


그림 1. SCS 수문곡선

표 1 침투유출량 산정식의 형상계수 f_s

| 침투유출량 산정식 | 형상계수 f_s |
|-----------------|---|
| SCS 단일 삼각형법 | $\frac{1.5}{1+2t_p/t_R}$ |
| SCS 이중 삼각형법 | $\frac{4}{1+c(a+b)} \cdot \frac{1}{1+2t_p/t_R}$ |
| Kajiyama Method | $(11.2 I^{-1} + 0.1 t_R^{0.67}) \cdot \left(4 + \frac{A}{L^2}\right) \cdot A^n$ |
| Nakayasu Method | $\frac{t_R}{0.3t_p + t_k}$ |

지점우량 대비 면적우량 백분율 f_A 는 건기원(1998)식을 간략히 조정하여 다음에 제시되는 Horton(1940)의 지수형 산정식 (2)과 동일한 형태의 지수형 f_A 산정식을 개발하였다.

$$f_A = \text{EXP}\left(-0.016\left(\frac{A}{A_0}\right)^{0.5} \left(\frac{t_R}{t_0}\right)^{-0.6}\right) \quad (2)$$

여기서 $A_0 = 1 \text{ km}^2$, $t_0 = 1 \text{ hr}$ 이다.

형상계수 f_s 를 통하여 단순화된 수문곡선을 적분하여 첨두유출량 산정식 Q_p 에 적용하면 유역전체의 총유출량을 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$Q(t) = R_Q(t) \cdot Q_p \quad (3)$$

여기서 $R_Q(t)$ 는 수문곡선의 시간변위이다.

2.2 하천유출

하천흐름의 해석으로는 수문학적 홍수추적과 수리학적 홍수추적이 있다. 수문학적 홍수추적 방법중 하나인 Muskingum 방법은 저류 개념의 연속방정식에 근거하며 기존 통계자료를 이용하여 추정된 매개변수는 홍수 추적시 많은 영향을 미친다. 또한 기존에 개발된 수문학적 홍수추적모형은 홍수시 증소하천 유역에서와 같이 측방유입량에 의해 수위가 급변하는 경우에는 부적합한 결과를 나타낸다. 본 연구에서 개발한 [SIRG]모형은 수리학적 홍수추적 기법중의 하나인 Upstream Method를 사용하여 각 하천 격자별 유출수문곡선을 작성하였다.

개수로 부등류 연속방정식은 검사 체적에서 질량 유입과 질량 유출은 균형을 이룬다는 조건으로부터 유도되며 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B_S} \frac{\partial Q}{\partial x} = S_{HS} \quad (4)$$

여기서 h 는 개수로의 수심, Q 는 유량 그리고 B_S 는 개수로 수면의 폭이며, S_{HS} 는 측방유입량으로서 지표면 유입량이다.

부등류 운동량 방정식은 검사 체적에서 여러 종류의 힘이 평형을 이룬다는 조건으로부터 유도되며 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} - i\right) + \frac{C}{H}|V|Q = 0 \quad (5)$$

여기서 g 는 중력 가속도, A 는 개수로의 단면적, C 는 마찰계수, i 는 수로저면의 기울기, H 는 동수 반경(Hydraulic Radius)이다. 한편 측방유입이 하천흐름 방향에 직각으로 유입된다고 가정할 경우 측방유입량이 연속방정식에는 직접적으로 영향을 미치지 않지만 측방유입운동력의 하천흐름방향 성분이 없어 유선을 따라 표기된 운동량방정식에는 영향을 미치지 않는다.

Upstream Method는 편미분 방정식을 시간과 공간에 따라 차분화(Difference Equatio)하여 나타낸다. 전 시간단계에서 결정된 수심과 유속을 사용하여 다음 시간단계에서의 수심과 유속을 축차적으로 계산해 나가는 양해적(Explicit) 산정방식으로 상류에서 유입되는 유입수문곡선을 상류경계조건으로 사용한다.

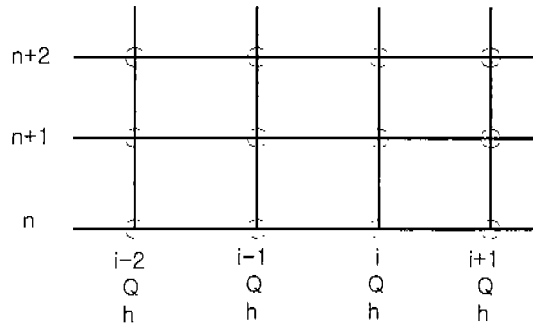


그림 2. Non-Staggered Mesh System

연속방정식 (4)와 운동량방정식 (5)를 Explicit 방법중의 하나인 Upstream Method를 사용하여 시간과 공간에 따라 차분한다. 운동량방정식은 이송가속항을 분리하여 식 (7)과 식 (8)로 분리하였다. 격자구성을 Staggered Mesh System과 Non-Staggered Mesh System을 이용하여 프로그램을 구성해본 결과 Staggered Mesh System은 합류점에서 수심의 전파에 의해 다소 문제점이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 Non-Staggered Mesh System을 이용하여 프로그램을 구성하였다 그림 2에 제시된 바와 같이 유량과 수심을 동일 격자상에 설정한 Non-Staggered Mesh System을 사용하여 차분식을 표기하면 다음과 같다.

$$\frac{h_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - h_{i-\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \frac{1}{B_s} \frac{Q_{i+1}^n - Q_{i-1}^n}{2\Delta x} = S_{HS}^n + S_{HG}^n \quad (6)$$

$$\frac{Q_i^* - Q_i^n}{\Delta t} + gA_i \left(\frac{h_{i+1}^{n+\frac{1}{2}} - h_{i-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x} - i_i \right) + \frac{C_i}{H_i} |V_i^n| Q_i^* = 0 \quad (7)$$

$$\frac{Q_i^{n+1} - Q_i^*}{\Delta t} + \frac{Q_i^* V_i^* - Q_{i-1}^* V_{i-1}^*}{\Delta x} = 0 \quad (8)$$

한편 기존 1차원 하천모형은 직선부와 굴곡부의 흐름을 동일하게 해석하여 굴곡부에서의 유속이 과대 산정되는 반면 수위가 실 관측치보다 작게 산정되었다. 따라서 자연형 하천특징을 고려하기 위해 본 모형에서는 사행하천의 굴곡에 따라 가중치를 하천의 마찰계수 산정(유동훈, 2000)에 적용하였다.

2.3 지표면유출-하천유출 연계

본 연구에서는 시험유역인 양양 남대천유역을 그림 3에 제시된 바와 같이 도시 유출모형인 SWMM모형에서 이용된 개념을 도입하여 유역을 여러 개의 소유역으로 나누어 각 소유역에서의 지표면 유출을 각 하천 구간별 측방유입량으로 고려하여 해석하였다. 본 연구에서 개발한 [SIRG] 모형은 1999년 건기원 연구과제로 선정된 양양 남대천유역을 시험유역으로 선정하여 최대강우가 내린 8월 1일에서 3일까지의 집중 강우를 적용하였다. 유량 관측지점과 강우관측지점은 남대천 본류에 위치하고 있으며 강우관측은 3개 지점에서 자기식 강우관측기를 이용하여 관측하였으며 5개 지점에서는 목측으로 10회 관측하였으며 1개 지점(용천교)에서의 수위관측은 자동수위관측기를 이용하여 10분간격으로 강우시 2일 이상 관측하였다.

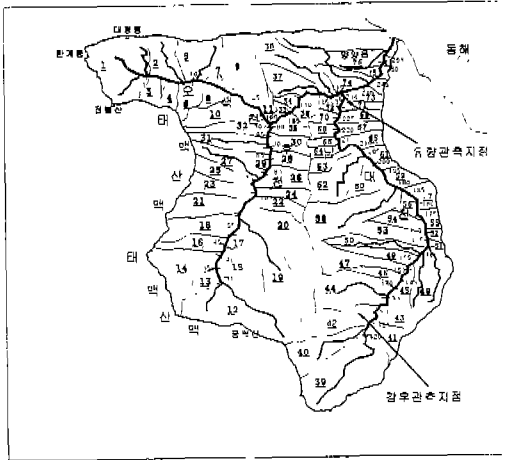


그림 3. 양양 남대천 유역의 소유역 및 하천 구성도

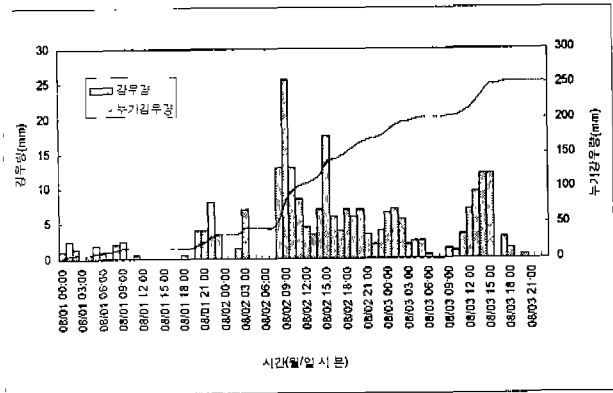


그림 4. 강우관측자료(강우량과 누가강우량, 면옥치리 지점)

지표면 유출은 강우시 토양상태에 의해 초기 유출곡선 형상이 다르게 나타나며 강우가 지속될 수록 토양내의 보유 수량의 증가로 유출이 증가한다. 따라서 지표면 유출 해석시 토양상태의 고려는 초기 유출 산정시 매우 중요한 부분을 차지한다. 그림 3에 제시된 바와 같이 유출 해석시 토양의 상태에 따른 침투율 변화를 고려하지 않고 적용할 경우 초기 강우시 유출곡선 형상이 그림 2에 제시된 강우관측자료의 형상과 비슷하게 나타난다. 즉 침투율의 변화를 고려하지 않을 경우 강우초기에 유효강우가 크게 나타나 유출량이 과대 산정된다. 본 연구에서 제시한 도달시간 산정시 침투율의 변화를 고려하지 않은 유효강우를 적용할 경우 도달시간이 짧게 나오며 반면에 침투유량은 과대산정되는 경향이 있다. 따라서 그림 5에 제시한 바와 같이 강우 초기 관측치보다 과대산정되는 경향이 발생한다.

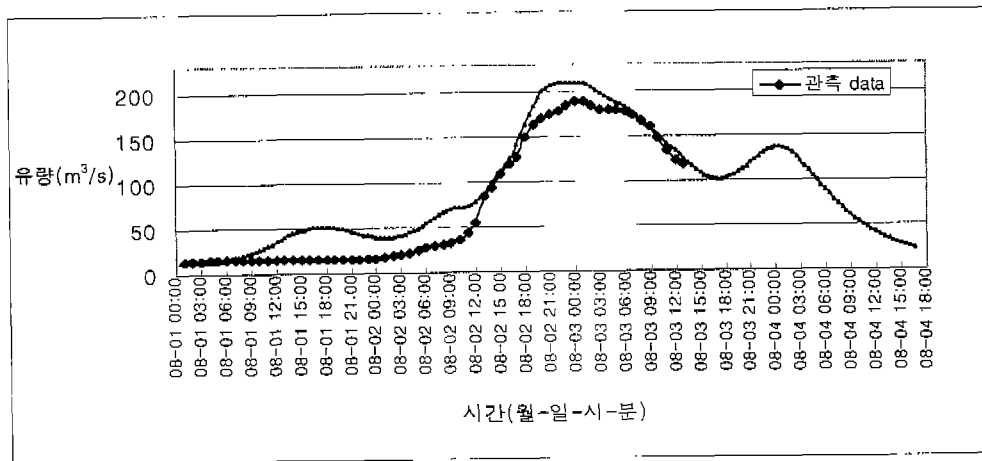


그림 5. 침투를 고려하지 않은 하천유출변이 (용천교 지점)

강우 초기 침투율 변화의 고려는 이와 같이 초기 유출수문곡선 산정시 매우 중요한 부분을

차지하고 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 [SIRG]모형에서는 토양의 상태에 따른 침투율의 변화를 고려하였으며 도달시간 산정시 침투율의 변화를 고려하여 도달시간과 침투유량을 산정하였다. 강우자료와 유역자료를 [SIRG]모형에 적용하여 산정한 결과 연속 관측을 실시한 관측점에서의 관측 자료와 비교하여 전 시간대에 걸쳐 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 강우 초기에는 대부분의 강우가 지표면으로 침투하여 지표면 유출이 거의 발생하지 않으며 강우가 지속될수록 하천으로 유입되는 지표면유출이 많아진다. 본 시험유역이 산악지역인 특성상 유출이 급격히 증가하며 하강 또한 급격히 발생한다. 관측치와 프로그램 산정치와 비교해본 결과 유량이 급속히 증가하는 부분에서 동일 유출량에 도달하는데 1~2시간정도의 오차가 발생하였다.

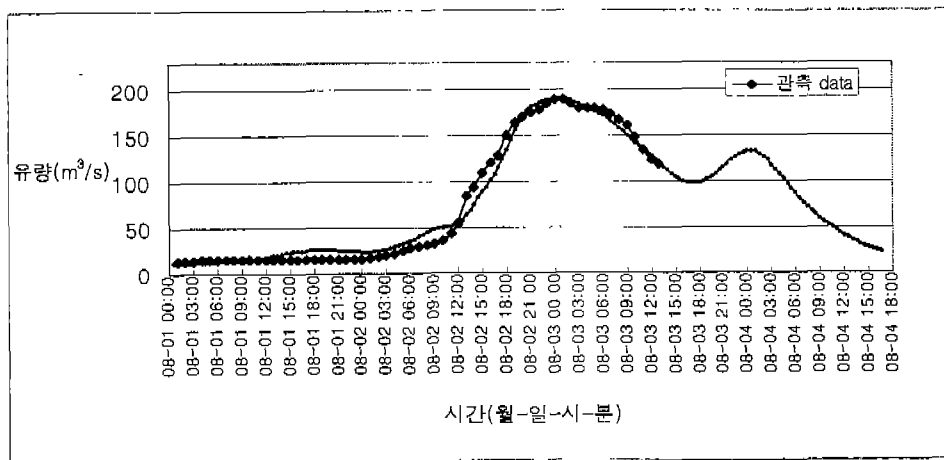


그림 6. 침투를 고려한 하천유출의 시간변이 (용천교 지점)

3. 결론

본 연구에서 개발한 [SIRG]모형은 수리학적 홍수추적기법을 사용하여 홍수시 급격한 수위변화를 예측할 수 있어 증소하천과 같이 홍수시 하천 범람이 빈번히 발생하는 유역에서는 실강우에 의한 빠른 홍수예경보를 수행할 수 있다. 추후 [SIRG]모형의 입·출력시 번거로움을 해결하기 위해 GIS와의 연계와 Window 버전으로 개발할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 건설교통부 연구과제인 “지표수-지하수 연계운영 시스템 개발”의 일환으로 이루어진 것이며, 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- 유동훈 (2000). 수리학. 도서출판 새론.
- Horton, R. E. (1940), "An Approach Toward a Physical Interpretation of Infiltration Capacity" Soil Science Society of America 5: 399-417