

안성천 홍수에경보 시스템 구축

유 동 훈*, 오 윤 창**

1. 서 론

전 세계적으로 1990년대 이후 이상 기후인 엘니뇨와 라니냐 등에 의해 기상 및 기후의 이상변동이 발생하고 있다. 우리나라도 마찬가지로 이와 같은 기상 이상으로 인해 1996, 1998, 1999, 2000년 4년간에 걸쳐 발생한 경기 남·북부 지역의 홍수피해로 인해 많은 재산 피해와 인명 피해를 경험하였다. 또한 급속한 도시화로 인해 유출 속도의 증가와 저류지로서의 역할을 하던 농경지의 감소로 인해 강우에 의해 발생하는 지표면 유출이 급속도로 빠르게 하천으로 유입된다. 이와 같이 집중적인 호우와 도시화로 인한 유출계수의 증가는 기존 하천 제방의 붕괴와 하천수의 월류를 유발하여 단시간내에 많은 피해가 발생하고 있다. 집중호우로 인한 피해는 불과 3~4시간 안에 많은 피해를 발생시킬 수 있으므로 빠른 예측을 통한 조기 경보가 필요한 시점이다.

안성천 유역은 경기 남부, 한강이남에서 가장 큰 도시유역으로 수원, 평택, 안성 등 여러 주요도시가 산재하여 있으며, 홍수시 빠른 유출로 인한 급격한 유량 증가와 수위 변화가 예상된다. 따라서 안성천 유역내 강우, 수위 등의 관측자료를 계속적으로 수집하고 통합 운영하여 홍수 예경보 시스템을 구축한 후 집중호우시 각 유역에서의 수위와 유량 변화에 의한 방제대책을 세울 필요가 있다. 지표면 유출, 지표하 침투류, 하천유출, 지하수 흐름 등을 동적으로 연계한 통합모형 [SIRG]를 이용하여 수원천, 황구지천, 진위천 등이 포함된 안성천 유역에 적용하여 홍수예경보 시스템을 구축하였으며 관측자료를 확보하여 모형검증과 함께 현장적용성을 확인하였다.

2. 지표면-하천 연계모형

2.1 지표면 유출

기존 합리식의 형태로 나타낸 홍수유출량 산정식은 다음과 같다.

$$Q_p = CIA \quad (1)$$

여기서 Q_p 는 침투유량, C 는 유출계수, I 는 어느 일점에서의 강우강도, A 는 유역면적이다.

기존 합리식에서 가정된 조건인 이등변 삼각형 수문곡선은 실제 유출시 발생하는 수문곡선의 형태와 비교하여 상당한 차이점이 있다. 실제 유출수문곡선에서는 하강곡선이 상승곡선보다 완만하게 변이하여 이등변 삼각형 수문곡선으로 가정하였을 경우 유출량을 과대 산정하는 경향이 있다. 이와 같이 기존 합리식에서 제시한 이등변 삼각형은 침투 유출량의 과대 산정 뿐 아니라 비교적 작은 유역에만 적합한 형태이기 때문에 실제 유역에 적용하는데는 많은 문제점이 있다. 본 연구에서는 실제 유출시 발생하는 수문곡선의 형태를 나

* 아주대학교 환경도시공학부 교수

** 아주대학교 건설교통학과 석사과정 졸업

타내기 위해 형상계수 f_s 와 면적평균을 f_A 를 도입하여 다음과 같이 제시하였다.

$$Q_P = f_s \cdot f_A \cdot CIA \quad (2)$$

여기서 f_s 는 수문곡선 형상에 따라 결정되는 형상계수이며, f_A 는 지점우량 대비 면적우량 백분율이다. 본 연구에서는 수문곡선형상으로 SCS 단일삼각형법과 이중삼각형법 및 Nakayasu Method에 내포된 곡선형상을 고려하여 형상계수의 추정식을 개발하였다.

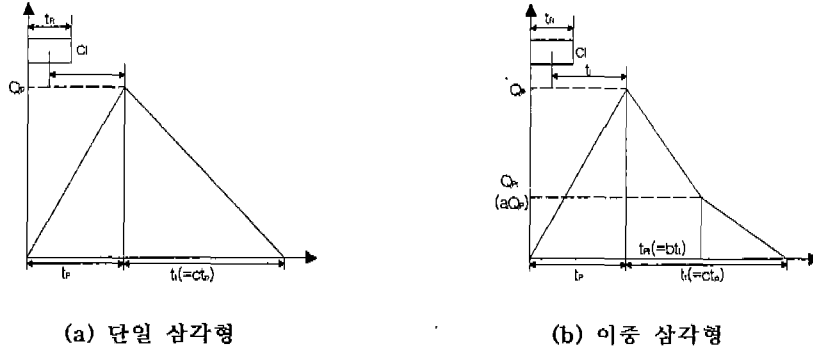


그림 1. SCS 수문곡선

SCS는 수문곡선을 단일삼각형으로 가정할 경우 합리식의 이등변 삼각형과 달리 하강곡선이 상승곡선보다 긴 삼각형으로 가정하였다. SCS 단일 삼각형법 수문곡선을 그림 1(a)에 제시하였으며 침투시간, 지속시간, 하강시간이 다르다는 가정 하에 직접 유출량을 산정하였다. 또한, SCS 이중삼각형법은 단일삼각형법의 수문곡선을 실제 유출현상과 좀 더 유사하게 개선한 것으로 수문곡선의 하강구간을 두 개의 기울기를 갖는 곡선으로 제시하였다. SCS 단일삼각형법과 이중삼각형법, Nakayasu Method로부터 유도된 형상계수 f_s 를 표 1에 정리하였다.

표 1. 침투유출량 산정식의 형상계수

침투유출량 산정식	형상계수 f_s
SCS 단일 삼각형법	$\frac{1.5}{1+2t_p/t_R}$
SCS 이중 삼각형법	$\frac{4}{1+c(a+b)} \cdot \frac{1}{1+2t_p/t_R}$
Nakayasu Method	$\frac{t_R}{0.3t_p+t_k}$

표 2. 지점우량 대비 면적우량 백분율

지속 시간	회귀식(%)
1	$f_A = 0.702 + (1-0.702) \times 0.9938^A$
2	$f_A = 0.767 + (1-0.767) \times 0.9940^A$
3	$f_A = 0.813 + (1-0.813) \times 0.9942^A$
6	$f_A = 0.889 + (1-0.889) \times 0.9945^A$
12	$f_A = 0.921 + (1-0.921) \times 0.9945^A$
24	$f_A = 0.944 + (1-0.944) \times 0.9945^A$

지점우량 대비 면적우량 백분율 f_A 는 지점 강우를 면적 강우로 환산하는 계수로 설계강우에는 적용하는 반면, 관측을 통한 실제 강우시에는 적용하지 않는다. 본 연구에서는 건기원(1988)에서 제시한 회귀식(표 2)을 간략히 조정하여 지수형 산정식(3)으로 개발하였다.

$$f_A = \text{EXP}(-0.016(\frac{A}{A_0})^{0.5} (\frac{t_R}{t_0})^{-0.6}) \quad (3)$$

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

형상계수 f_s 와 면적유량 백분을 f_A 를 통하여 단순화된 수문곡선을 적분하여 침투유출량 Q_p 에 적용하면 유역전체의 총유출량을 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$Q(t) = R_Q(t) \cdot Q_p \quad (4)$$

여기서 $R_Q(t)$ 는 수문곡선의 시간변이율이다. 시간변이율 R_Q 는 수문곡선의 형상에 따라 결정되며, 이중삼각형으로 가정하였을 경우 계수 a, b, c 등의 수치에 따라 수문곡선의 형상이 결정된다.

한편 실제 강우기록은 단일 침투를 나타내는 이상적인 강우가 아니라 여러 개의 침투를 나타내는 복합적인 호우사상이 대부분이며, 총유출수문곡선은 서로 다른 강도의 초과우량에 대한 시간별 유출수문곡선의 중거를 더하여 나타내었다. 반면, 유출계수는 침투율과 토양 수분 함유상태의 시간 변화를 고려한 비선형식으로 다음과 같이 제시하였다.

$$C = \gamma \eta^\zeta C_B \quad (5)$$

여기서 C_B 는 토양 수분상태의 시간 변화를 고려하지 않은 유출계수, η 는 그림 2에 도시된 바와 같이 총토포 H_t 에 대한 저류깊이 H_s 의 비율, 즉 $\eta = H_s/H_t$ 이다. 각 경험계수는 $\gamma \approx 1.0-1.5$, $\zeta \approx 1.0-2.0$ 로 예상되며 대상유역의 조건에 따라 수치조정하였다.

유출 수문곡선 작성에 있어 도달시간은 침투유량 추정에 있어 매우 중요한 계수이다. 기존 경험식은 도달 시간 산정시 지표면 흐름을 전란류라 가정한 반면, 본 연구에서 지표면 유출은 전란류보다는 주로 층류 또는 완란류 흐름에 가깝다고 보았다. 따라서 도달시간을 Singh(1976)의 이론적 방정식에 근거하여 지표면 흐름을 층류 흐름으로 가정하고 다음과 같이 제시하였다(유동훈과 전우용, 2000).

$$t_c = \left(\frac{\alpha \nu L}{gSI} \right)^{1/3} \quad (6)$$

여기서 t_c 는 도달시간, α 는 지표면 상태에 따른 경험상수, g 는 중력가속도, S 는 지표면 경사, ν 는 점성계수, L 는 유역길이, I 는 강우강도이다.

2.2 하천유출

개수로 부정류 연속방정식은 검사 체적에서 질량의 유입과 질량의 유출은 평형을 이룬다는 조건으로부터 유도되며 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B_s} \frac{\partial Q}{\partial x} = S_H \quad (7)$$

여기서 h 는 개수로의 수심, Q 는 유량 그리고 B_s 는 개수로 수면의 폭이며, S_H 는 측방유입량으로서 지표면 유입량 또는 지하수 유출입량이다.

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA_R \left(\frac{\partial h}{\partial x} - i \right) + \frac{C}{H} |V|Q = 0 \quad (8)$$

여기서 A_R 은 개수로의 통수단면적, C 는 마찰계수, i 는 수로저면의 기울기, H 는 동수반경(hydraulic radius)이다. 한편 측방유입이 하천흐름 방향에 직각으로 유입된다고 가정할 경우 측방유입량이 연속방정식에는 직접적으로 영향을 미치지만 측방유입운동력의 하천흐름방향 성분을 무시할 수 있어 유선을 따라 표기된 운동량방정식에는 영향을 미치지 않는다.

식(7)에서 S_H 는 지표면유입량과 지하수 유출입량의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_H = S_{HS} + S_{HG} \quad (9)$$

여기서 S_{HG} 는 하천과 지하수간의 유출입량이며, S_{HS} 는 하천 구간내 하천 표면적당 지표면에서 유입되는 유량으로 다음과 같다.

$$S_{HS} = \frac{Q_S}{A_w} \quad (10)$$

Q_S 는 지표면유입량, A_w 는 하천 수표면의 면적이다. 하천과 지하수간의 유출입을(단위 면적당 유량) S_{HG} 는 유량 Q_G 를 수표면적 A_w 로 나누어 주면 다음과 같다.

$$S_{HG} = \frac{Q_G}{A_w} = \frac{q_G \Delta s}{\Delta s \times B_s} = \frac{q_G}{B_s} \quad (11)$$

여기서 B_s 는 수표면의 폭이다.

지하수로부터 하천으로 유입되는 유량 Q_G 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_G = q_G \Delta s \quad (12)$$

q_G 는 단위폭당 유량이고 Δs 은 하천 단면간의 거리이다.

편미분 방정식을 시간과 공간에 따라 차분화(Difference Equation)하여 해를 구한다. 전 시간단계에서 결정된 수심과 유속을 사용하여 다음 시간단계에서의 수심과 유량을 축차적으로 계산해 나가는 양해적(Explicit) 산정방식으로 상류에서 유입되는 유입수문곡선을 상류경계조건으로 사용한다.

3. 모형의 적용

본 연구에서 개발된 수문-수리 해석용 수치모형 [SIRG]의 검증용을 위하여 경기도 안성천 유역을 대상유역으로 정하였다. 현장관측을 2000년 7-8월 우기에 집중적으로 실시하였으며, 그 기간중 최대강우가 내린 7월 22일에서 23일까지의 관측 자료를 적용하여 모형의 검증을 실시하였다. 수치모형 [SIRG]는 이미 강원도 양양 남대천 유역을 시험유역으로 선정하여 모형 검증과 현장 적용성을 확인하였다. 양양 남대천 유역은 유역 면적이 468km² 이고 대부분 산악지역인데 비하여 본 연구 대상유역인 안성천 유역은 1,699km²으로 유역면적이 매우 크고 비교적 완만한 경사의 평지를 이루고 있다. 지형경사가 급하여 유출계수가 큰 산악지역으로 도달 시간이 짧은 유역특성과 사행하천을 이루고 있는 양양 남대천유역을 대상으로도 수치모형 [SIRG]의 모의 결과는 관측자료와 비교하여 양호한 산정결과를 얻었다. 유역면적의 대부분이 산악지역과 농경지로 이루어진 양양 남대천 유역과는 달리 안성천 유역은 하천을 따라 주요도시가 형성되어있다. 대상유역의 평균 표고는 약 80m이며, 평균경사는 16%정도이고, 유역내 시가지 지역은 5%정도를 차지하고 있다. 유역내 하천의 형태는 나뭇가지 모양으로 뻗어 있으며 총 하천 연장은 약 740km, 하천밀도는 0.44km/km²이다.



그림 2. 안성천 유역의 소유역 구성도

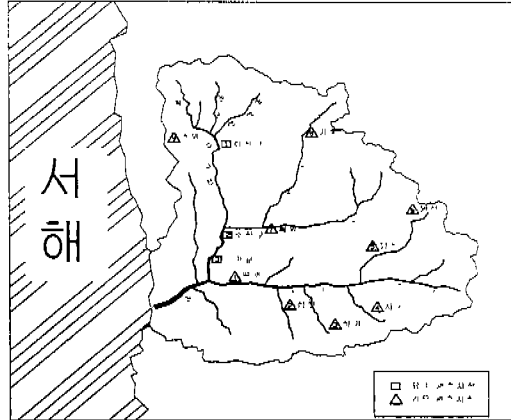


그림 3. 안성천 유역의 관측지점도

대상유역인 안성천 유역을 그림 2에 제시된 바와 같이 유역수계에 따라 186개의 소유역으로 나누어 각 소유역에서의 지표면 유출을 하천 각 구간별 측방유입량으로 고려하여 해석하였다. 그림 3에 제시된 유량 관측 지점과 강우관측지점은 안성천 유역내 황구지천, 진위천, 안성천에 위치하고 있으며 강우자료는 건설교통부에서 관리하는 T/M 우량 관측소의 관측자료를 이용하였다. 하천 수위관측과 유속관측은 안성천내 주요 지점인 화산교, 수직교, 중앙교에서 폭우가 내린 2일동안 집중적으로 실시하였다. 그러나 관측점에서의 침투유량 발생시 하천의 범람 및 대상지역 교통통제로 인하여 관측자료를 수집하지 못하였다. 한편 안성천유역 9개의 강우관측자료를 안성천 유역내 수원천, 황구지천, 진위천, 오산천, 안성천유역으로 분할하여 적용하였다. 안성천 유역의 하천단면은 모형 적용의 단순화를 위하여 제형으로 가정하였다.

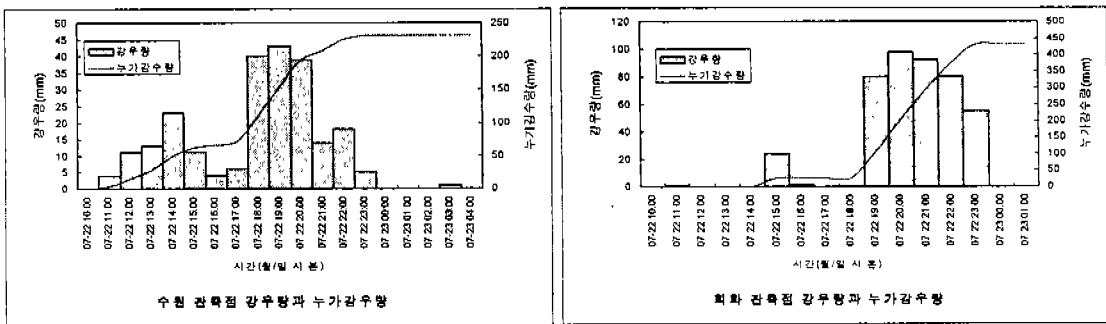


그림 4. 2개 지점의 강우관측자료 (강우량과 누가 강우량)

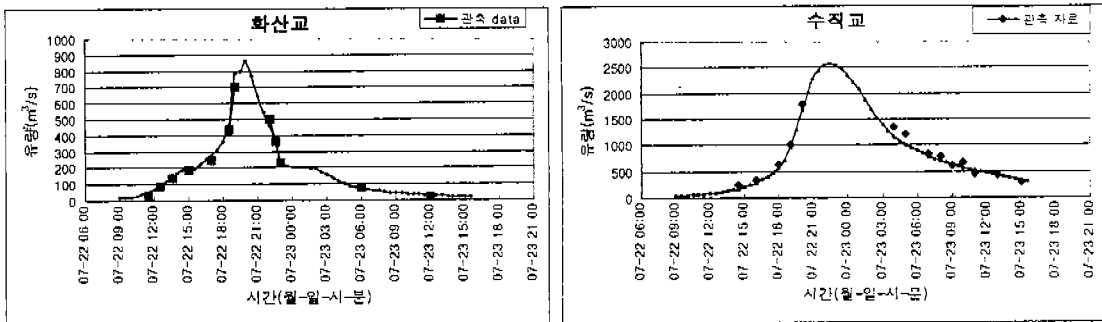


그림 5. 하천 유출의 시간변이

지표면 유출은 강우시 토양상태에 의해 초기 유출 곡선 형상이 다르게 나타나며 강우가 지속될수록 토양 내 보유 수량의 증가로 유출이 증가한다. 따라서 지표면 유출 해석시 토양상태의 고려는 초기 유출 산정시 매우 중요한 부분을 차지한다. 본 연구에서 적용한 [SIRG]모형에서는 토양의 상태에 따른 침투율의 변화를 고려하였으며 도달시간 산정시 침투율의 변화를 고려하여 도달시간과 침투유량을 산정하였다. 강우자료와 유역자료를 [SIRG]모형에 적용하여 산정한 결과 그림 5에 제시된 바와 같이 관측점에서의 관측자료와 비교하여 전 시간대에 걸쳐 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 개발한 모형 [SIRG]는 합리식에 근거한 [RRL]이나 [ILLUDAS], [SWMM] 모형등의 장점과 기능들을 종합하고 단점들을 보완한 모형인데 도시유역이나 농림유역에 광범위하게 적용할 수 있다. 기존 도시유출모형은 유역면적에 제한이 있는 단점을 가지고 있으나 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하고자 지표면유출 해석시 유역면적에 따른 유역계수와 수문곡선의 형상에 따른 형상계수를 도입하였으며 침투를 고려하여 초기의 급격한 상승을 제거하였다. 또한 도달시간 산정에 있어 지형학적 특성외에 기상학적 특성인 재현기간에 따라 달라지는 강우강도의 변이 특성을 반영하였다. 시험 유역을 여러 개의 소유역으로 나누어 각 소유역별 지표면 특성을 고려하여 지표면유출량을 산정하였다. 각 소유역으로부터 유출된 유출량은 하천 각 단면의 측방유입량으로 처리하여 강우의 급격한 변이가 발생할 때에도 수치적 안정을 확보하였다.

양해적 해석법중의 하나인 후향차분법을 사용하여 하천 각 구간에서의 급격한 수위 및 유량 변화를 실시간으로 예측하여 증소하천과 같이 홍수시 하천 범람이 빈번히 발생하는 유역에서는 실강우에 의한 빠른 홍수예경보를 수행할 수 있다. 또한 자연형 하천특징을 반영하기 위해 사행하천의 굴곡부에 따른 가중치를 마찰계수에 적용하였으며 수공구조물이나 자연 저류지의 영향으로 인한 흐름변화를 지배방정식에 고려하였다.

참고문헌

- [1] 건교부. 한국 확률강우량도 작성, 수자원 관리기법 개발 연구조사보고서, 1988.
- [2] 유동훈, 전우용, "불투수층 사면에서의 도달시간", 한국수자원학회논문집, 제33권, 제1호, pp. 195-205, 2000.
- [2] Horton, R. E., "An approach toward a physcal in terpretation of infiltration capacity", Soil Science Society of America, Vol. 5, pp. 399-417, 1940.
- [3] David, H.P. and Russell, G.H., "Independent comparison of three urban runoff models", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 100, No. 7, pp. 995-1009, 1974.
- [4] Hydrologic Engineering Center, HEC-RAS, User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, 1997.
- [5] Singh, V.P. "Derivation of time of concentration", Journal of Hydrology, Vol. 30. pp. 147-165, 1976.
- [6] Tom, A. and Apelt, C.J., Field Computations in Engineering and Physics, Van Nostrand, New York, 1961.