

지표면-하천 유출의 연계 수치모형 Conjunctive Numerical Model of Surface Runoff and River Flow

유 동 훈* / 이 정 영**
Yoo, Dong Hoon / Lee, Jung Young

Abstract

In this study, hydraulic routing model has been developed to predict the water level and discharge in each river section with considering the full interaction between surface runoff and river flow. It improved the computation of flood runoff by reflecting the shape of hydrograph that was determined by the geological and flood characteristics, and the excessive computation of the peak discharge was eliminated by considering the effect of infiltration. The inflow from surface runoff to river flow was applied to the equation of continuity by implementing effectively the flow in a number of river section, and resulted in a numerical stability at the rapid variation of rainfall. Measurements were conducted during heavy rain in the watershed area of Yang-Yang Namdae-Chun. The present model was tested to the field, and the computed results were compared to the observed data. Its applicability was confirmed with its verification.

keywords : hydraulic routing, surface runoff, river flow, infiltration, peak discharge, numerical stability

요 지

본 연구에서는 지표면유출과 하천유출의 실시간 연계를 통하여 하천 각 구간에서의 수위와 유량을 예측하는 수리학적 홍수추적 모형을 개발하였다. 주로 유역의 지형특성에 따라 결정되는 수문곡선의 형상을 반영하여 홍수 유출량 산정법을 개선하였으며, 침투과정을 고려하여 강우초기 침투유량의 과다산정을 제거하였다. 지표면유출의 하천유입을 연속방정식에 반영하여 여러 단면에서의 유입이 용이하였으며, 이는 강우의 급격한 변이에서도 수치적 안정을 가져다 주었다. 폭우시 양양 남대천 유역에서 현장 관측을 실시하였으며, 관측자료에 적용하여 개발된 모형의 현장 적용성과 신뢰성을 확보하였다.

핵심용어 : 수리학적 홍수추적, 지표면 유출, 하천 유출, 침투, 침투유량, 수치적 안정

* 아주대학교 토목설계공학과 교수
Professor, Department of Civil Engineering, Ajou Univ., Suwon, Kyonggi 442-749, Korea
(E-mail : dhyoo@madang.ajou.ac.kr)

** 아주대학교 건설교통공학과 석사과정
Graduate Student, Department. of Civil and Traffic Engineering, Ajou Univ., Suwon, Kyonggi 442-749, Korea

1. 서 론

강우유출은 지표면유출, 하천유출, 복류수유출, 지하수유출로 구성되며 이 중 지표면유출과 하천유출은 지표수로 볼 수 있다. 지표면유출은 강우유출 중에서 많은 부분을 차지하며 강우시 단기간에 하천으로의 유입을 통해 하천유량의 급격한 증가와 수위를 급상승시킨다. 반면 지하수유출은 지표면유출과는 달리 직접유출이 끝난 후에도 장기간 계속 나타나며 집중호우시 지표면유출과는 반대로 단기간에는 하천유량과 수위에 미치는 영향을 거의 판별할 수 없다. 이와 같이 강우시 지표면유출은 하천수위에 많은 영향을 미치기 때문에 각 유역별 수문곡선 작성은 시간별 하천으로의 유입량 산정에 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 그러나 침투과정은 강우초기 지표면유출에 심대한 영향을 미치기 때문에 강우유출 해석에 있어 중요하게 고려되어야 할 항목이다.

지표면유출이란 강우의 일부분이 지표 또는 하천으로 흐르는 과정으로 적용 유역의 기후인자와 유역특성, 수로특성 및 토지이용을 나타내는 지역인자들의 영향을 받는다. 따라서 유출량을 산정하는 모형이나 산정식들은 기후인자와 지역인자의 적절한 추정을 통하여 개발되어야 한다. 현재 수자원 설계 실무에서 주로 이용하고 있는 공식은 SCS(Soil Conservation Service) Method, 합리식, Nakayasu Method 등이고 유출모형으로 RRL(Road Research Laboratory) Model, ILLUDAS Model(1974) 등이 있다. SCS Method는 지형조건에 따라 결정되는 CN치에 의해 결정되는 방법이고 합리식은 유역에 발생하는 강우의 강우강도와 유역면적으로부터 유역출구에서의 침투홍수량을 결정하는 단순한 공식으로 여러 단점과 불합리한 점들이 있지만 사용상 편리성과 단순성 때문에 현재까지도 많이 이용되고 있다. RRL, ILLUDAS 등의 모형들도 유출량을 결정하는 기본 공식으로 SCS Method나 합리식을 사용하고 있다. 기존 유출모형인 [RRL], [ILLUDAS], [SWMM] 등의 모형은 지표면유출 산정시 유역면적의 크기에 제한이 있는 단점이 있어 본 연구에서는 유역면적의 크기에 따른 유역계수와 수문곡선의 형상에 따른 형상계수를 도입하여 침투유출량을 산정하였다.

기존 하천 해석프로그램인 HEC-RAS(1997)는 하천 상류의 유입곡선과 하류의 유출곡선을 경계조건으로 사용하며 대하천과 같이 잘 정비된 하천과 수로에

의 적용에는 큰 문제점이 없으나 중소하천과 같이 정비가 불량한 자연형 하천에 대하여는 사행성을 충분히 고려하지 않아 문제점이 많다. 또한, 널리 상용화되고 있는 수문해석프로그램인 HEC-HMS(1997)는 기존 미공병단에서 개발한 HEC-1(1990)을 개선시킨 프로그램으로 지표면유출과 하천유출을 연계하여 각 유역출구 지점에서의 유출수문곡선을 작성하는 프로그램이다. 반면, 지표면유출은 하천유출 해석시 유입경계조건으로만 사용되고 측방유입량으로는 고려하지 않아 홍수시 중소하천과 같이 하천 측방으로 유입되는 지표면유출에 의해 하천 유량과 수위가 급변하는 유역에서는 유량과 수위 산정에 적합한 결과를 나타내지 못한다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하고자 지표면유출과 하천유출을 각 구간별로 실시간으로 연계하여 유역 각 지점에서의 유출수문곡선과 하천 각 지점에서의 유량과 수위 변화를 예측하는 모형을 개발하였다. 유역면적 468km²인 양양 남대천 유역에서 폭우시 현장관측을 수행하였으며, 수집된 관측자료를 이용하여 개발된 모형을 검증하고 현장적용성과 사용자 편의성을 부여하였다.

2. 지표면-하천 연계모형

2.1 지표면 유출

기존 합리식의 형태로 나타난 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 합리식의 가정된 조건인 이등변 삼각형은 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 유역에서 나타나는 형태이기 때문에 실제 유역에 적용하는데는 많은 문제점이 있다. 본 연구에서는 실제 유출시 발생하는 수문곡선의 형태를 나타내기 위해 형상계수 f_s 와 평균유 f_A 를 도입하여 다음과 같이 제시하였다.

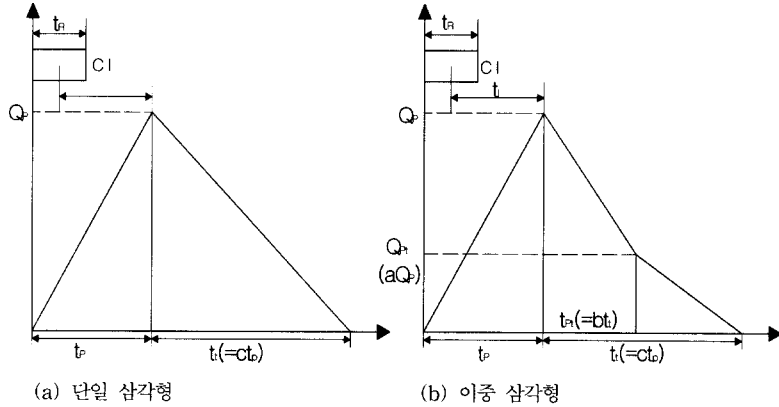


그림 1. SCS 수문곡선

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

여기서 f_s 는 수문곡선 형상에 따라 결정되는 형상계수이며, f_A 는 지점우량 대비 면적우량 백분율이다. 본 연구에서는 수문곡선형상으로 그림 1에 제시된 SCS 단일 삼각형법과 이중 삼각형법 및 Nakayasu Method에 내포된 곡선형상을 고려하여 형상계수의 추정식을 개발하였다.

SCS는 수문곡선을 단일삼각형으로 가정할 경우 합리식의 이동변 삼각형과 달리 하강곡선이 상승곡선보다 긴 삼각형으로 가정하였다. SCS 단일 삼각형법 수문곡선을 그림 1(a)에 제시하였으며 첨두시간, 지속시간, 하강시간이 다르다는 가정 하에 직접 유출량을 산정하였다. 질량 불변의 법칙에 의하여 강우총량은 다음과 같다.

$$R_0 A = \frac{1}{2} Q_p (t_p + t_t) \quad (3)$$

$$Q_p = \frac{2 R_0 A}{t_p + t_t} \quad (4)$$

여기서, t_p 는 첨두시간, t_t 는 하강시간이고 R_0 는 유효강우량이며 강우강도와 지속시간의 t_R 곱 ($R_0 = C t_R I$)으로 나타내면

$$Q_p = \frac{2 t_R}{t_p + t_t} C I A \quad (5)$$

즉, SCS 단일 삼각형법인 경우 형상계수는 다음과 같다.

$$f_s = \frac{2 t_R}{t_p + t_t} \quad (6)$$

SCS에서 보통 하강시간 t_t 는 첨두시간 t_p 의 1.67배로 가정하며 식 (6)의 하강시간을 $t_t = 1.67 t_p$ 로 대입하고 첨두시간을 지속시간과 지체시간의 합 ($t_p = t_\ell + 0.5 t_R$)으로 나타내면 형상계수 f_s 는 다음과 같은 식으로 유도된다.

$$f_s = \frac{1.5}{1 + 2 t_\ell / t_R} \quad (7)$$

SCS 이중삼각형법은 단일삼각형법의 수문곡선을 실제 유출현상과 좀 더 유사하게 개선한 것으로 수문곡선의 하강구간을 두 개의 기울기를 갖는 곡선으로 제시하였다. 그림 1(b)을 참조하여 나타낸 첨두유출량 Q_p 산정식은 다음과 같다.

$$R_0 A = \frac{1}{2} [Q_p t_p + (1+a) b Q_p t_t + (1-b) a Q_p t_t] \quad (8)$$

$$Q_p = \frac{2 R_0 A}{(t_p + a t_t + b t_t)} \quad (9)$$

여기서, 식 (8)의 유효강우량을 강우강도와 지속시간의

표 1. 침투유출량 산정식의 형상계수 f_s

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

곱($R_0 = C t_R I$)으로 나타내면

$$Q_p = \frac{2 t_R}{(t_p + at_t + bt_t)} CIA \quad (10)$$

즉, SCS 이중삼각형법인 경우 또는 수문곡선을 이중삼각형으로 가정하였을 경우 형상계수는 다음과 같다.

$$f_s = \frac{2 t_R}{(t_p + at_t + bt_t)} \quad (11)$$

그림 1(b)에서와 같이 하강시간 t_t 는 침투시간 t_p 의 c 배이므로 식 (11)의 하강시간을 $t_t = ct_p$ 로 대입하고 침투시간을 지속시간과 지체시간의 합($t_p = \frac{t_R}{2} + t_e$)으로 나타내면 형상계수 f_s 는 다음과 같은 식으로 유도된다.

$$f_s = \frac{4}{1+c(a+b)} \cdot \frac{1}{1+2t_e/t_R} \quad (12)$$

Nakayasu Method는 실제 유출현상과 유사한 수문곡선으로 침투유출량 산정식은 합리식과 형상계수 f_s 의 함수로 수정하여 제시하면 다음과 같다.

$$Q_p = \frac{t_R}{0.3t_p+t_k} CIA \quad (13)$$

여기서 t_k 는 Q_p 에서 $0.3Q_p$ 로 감소하는데 필요한 시간이다. 즉 Nakayasu Method를 도입할 경우 형상계수는 다음과 같다.

$$f_s = \frac{t_R}{0.3t_p+t_k} \quad (14)$$

SCS 단일삼각형법과 이중삼각형법, Nakayasu Method로부터 유도된 형상계수 f_s 를 표 1에 정리하였다.

지점우량 대비 면적우량 백분율 f_A 는 건기원(1988)에서 제시한 회귀식(표 2)을 간략히 조정하여 다음에 제시되는 Horton(1940)식과 동일한 형태의 지수형 산정식 (15)로 개발하였다.

$$f_A = \text{EXP}(-0.016(\frac{A}{A_o})^{0.5} (\frac{t_R}{t_o})^{-0.6}) \quad (15)$$

여기서 $A_o = 1 \text{ km}^2$, $t_o = 1 \text{ hr}$ 이다. 식 (15)에 의한 f_A 산정결과와 표 2에 제시된 회귀식에 의한 산정결과를 비교하여 그림 2에 제시하였다. 두 산정 수치간의 최대 5% 정도의 차이가 발생하며 전체적으로 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

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

표 2. 지점우량 대비 면적우량 백분율 (한국건설기술원, 1988)

지속시간	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	$f_A = 0.944 + (1-0.944) \times 0.9945^A$

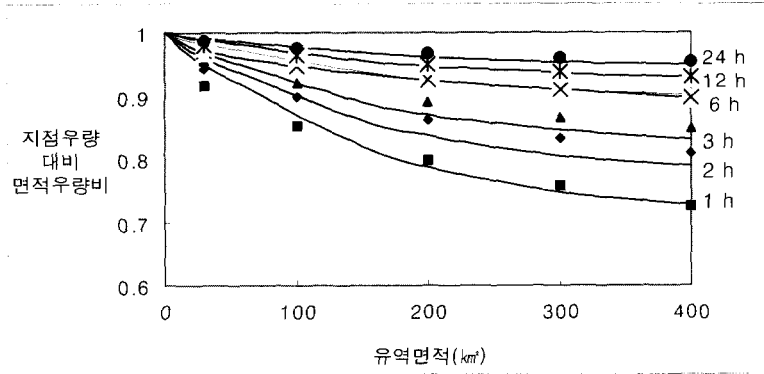


그림 2. 지수형 f_A 산정식과 회귀식 비교

$$Q(t) = R_Q(t) \cdot Q_D \quad (16)$$

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.

$$C = \gamma \eta^\zeta C_B \quad (17)$$

여기서 C_B 는 토양 수분상태의 시간 변화를 고려하지 않은 유출계수, η 는 그림 3에 도시된 바와 같이 총 토피 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 시험유역의 조건에 따라 수치조정하였다.

유출 수문곡선 작성에 있어 도달시간은 침투유량 추정정에 있어 매우 중요한 계수이다. 기존 경험식은 도달시간 산정시 지표면 흐름을 전란류라 가정한 반면, 본 연구에서는 지표면 유출은 전란류보다는 주로 층류 또는 완란류 흐름에 가깝다고 보았다. 본 연구에서는 도달시간을 Singh(1976)의 이론적 방정식에 근거하여

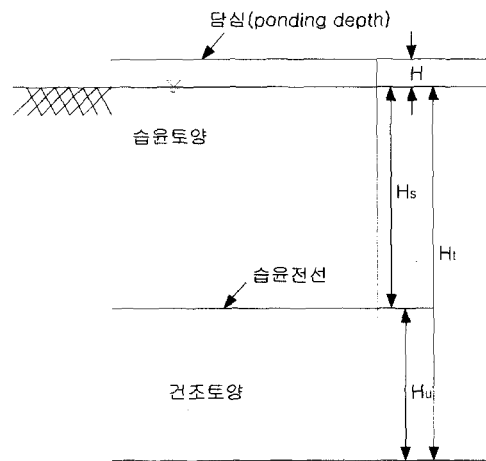


그림 3. 침투 모형도

지표면 흐름을 층류 흐름으로 가정하고 다음과 같이 제시하였다.

$$t_c = \left(\frac{\alpha L}{gSI} \right)^{1/3} \quad (18)$$

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

2.2.1 지배방정식의 차분화

HEC-RAS, DWOPER 등의 기존 하천유출 수치 모형은 지표면 유입량을 운동량 방정식에 도입하여 해를 구한다. 이러한 방법은 유역당 한 지점에서만 유입을 고려하는데 홍수유입의 급격한 변화가 있을 때 수치적 불안정을 가져올 수 있으며 여러 유역에서의 동시유입을 처리하기 곤란하다. 본 연구에서는 지표면유입량을 측방유입량으로 간주하여 연속방정식에 도입한다. 이 방법을 취하면 유역당 여러 지점에서의 유입을 고려하는 것이 용이하여 홍수유입의 급격한 변화가 있을 때에도 수치적 안정을 기할 수 있다.

개수로 부동류 연속방정식은 검사 체적에서 질량 유입과 질량 유출은 평형을 이룬다는 조건으로부터 유도되며 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B_s} \frac{\partial Q}{\partial x} = S_H \quad (19)$$

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

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA_R \left(\frac{\partial h}{\partial x} - i \right) + \frac{C}{H} |V|Q = 0 \quad (20)$$

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

$$S_H = S_{HS} + S_{HG} \quad (21)$$

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

$$S_{HS} = \frac{Q_S}{A_w} \quad (22)$$

여기서 Q_S 는 지표면유입량, A_w 는 하천 수표면의 면적이다. 지하수로부터 하천으로 유입되는 유량 Q_G 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_G = q_G \Delta s \quad (23)$$

여기서 q_G 는 단위폭당 유량이고 Δs 는 하천 단면간의 거리이다. 하천과 지하수간의 유출입율(단위 면적당 유량) S_{HG} 는 유량 Q_G 를 수표면적 A_w 로 나누어 주면 다음과 같다.

$$S_{HG} = \frac{Q_G}{A_w} = \frac{q_G \Delta s}{\Delta s \times B_s} = \frac{q}{B_s} \quad (24)$$

여기서 B_s 는 수표면의 폭이다.

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

연속방정식 (19)와 운동량방정식 (20)을 양해적 해석법중의 하나인 Upstream Method(Tom and Apelt, 1961)를 사용하여 시간과 공간에 따라 차분하였다. 운동량방정식은 이송기속항을 분리하여 식 (26)과 (27)로 분리하였다. 격자구성을 Staggered Mesh System과 Non-Staggered Mesh System을 이용하여 프로그램을 구성해본 결과 Staggered Mesh System은 합류점에서 연속방정식을 해석하는데 질량 불변의 법칙을 만족시키기 어려운 문제점이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 Non-Staggered Mesh System을 이용하여 프로그램을 구성하였다. 그림 4에 제시된 바와 같이 유량과 수심을 동일 격자점에 설정한 Non-Staggered Mesh System을 사용하여 차분식을 표기하면 다음과 같다.

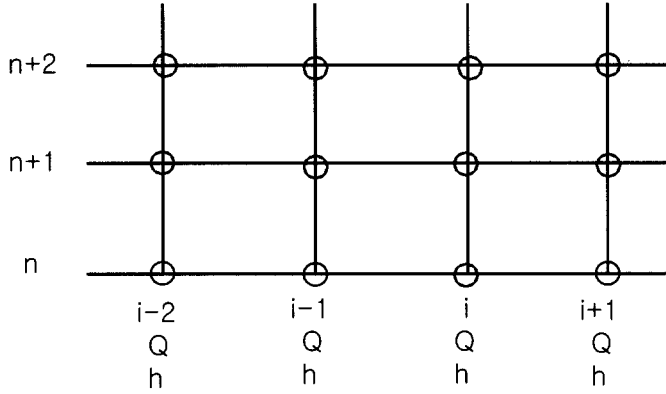


그림 4. Non-Staggered Mesh System

$$\frac{h_i^{n+\frac{1}{2}} - h_i^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \frac{1}{B_s} \frac{Q_{i+1}^n - Q_{i-1}^n}{2\Delta x}$$

$$= S_{HS}^n + S_{HG}^n$$

(25)

$$\frac{Q_i^* - Q_i^n}{\Delta t} + gA_i \left(\frac{h_{i+1}^{n+\frac{1}{2}} - h_{i-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x} - i_i \right)$$

$$+ \frac{C_i}{H_i} |V_i^n| Q_i^* = 0$$

(26)

$$\frac{Q_i^{n+1} - Q_i^*}{\Delta t} + \frac{Q_i^* V_i^* - Q_{i-1}^* V_{i-1}^*}{\Delta x}$$

$$= 0$$

(27)

식 (25)와 (26)에서 좌변에는 미지항인 n+1의 항을, 우변에는 기지수인 n의 항으로 전개하여 다음의 식 (28)과 (29)로 표시하였으며, 식 (29)에서 구한 Q_i^* 을 이송가속항인 식 (30)에 대입하여 Q_i^{n+1} 을 구하게 된다.

$$h_i^{n+\frac{1}{2}} = h_i^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \frac{1}{B_s}$$

$$(Q_{i+1}^n - Q_{i-1}^n) + \Delta t (S_{HS}^n + S_{HG}^n) \quad (28)$$

$$Q_i^* = (1 + \alpha)^{-1}$$

$$\left[Q_i^n + g A_i \Delta t \left(\frac{h_{i+1}^{n+\frac{1}{2}} - h_{i-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x} - i_i \right) \right]$$

(29)

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

(30)

여기서 $\alpha = \Delta t \cdot \frac{C_i}{H_i} \cdot |V_i^n|$ 이다.

식 (28)의 우변항의 값들은 n단계의 i-1, i+1 점의 값으로서 n+1 단계의 점 보다 한 시간단계 이전의 값들이다. 이와 유사하게 식 (29)에서도 좌변항은 구하고자 하는 다음 단계인 n+1 단계의 값이며, 이미 알고있는 기지의 단계값들을 우변에 둔다. 위의 결과식을 순차적으로 풀어 각 단계별로 값을 구하게 된다.

그러나 이와 같은 양해적 산정방식은 전 시간단계에서 다음 시간단계로 계산이 진행되면서 생기는 오차의 증폭에 의해 해가 수렴하지 않고 발산하는 경우가 생겨 해의 안정성 문제가 항상 내재되어 있다. 이와 같은 문제로 인해 해의 안정조건으로 다음과 같은 Courant 조건이 주어진다.

$$C_N = \frac{\Delta x}{\Delta t c_k} = \frac{\Delta x}{\Delta t \sqrt{gh}} < 1 \quad (c_k = \sqrt{gh})$$

(31)

여기서 C_N 은 Courant Number이며 c_k 는 파속이다. 양해적 해석법은 식 (31)로 주어진 C_N 이 1보다 작아야 되며 구간 간격에 비해 시간간격이 지나치게 클 경우 안정성에 문제가 생겨 프로그램 구성시 시간 간격을 작게 잡아야 하는 문제점이 있다.

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 따른 가중치를 하천의 마찰계수 산정에 적용하였다.

2.2.2 합류점 해석과 급사면 처리 기법

하천 본류에 지류의 유입이 있는 경우 합류점에서의 유량과 수심은 본류의 유량과 지류의 유량이 합쳐지게 됨으로서 유량과 수심의 변화가 동반된다. 이때의 유량과 수심을 구하기 위해 연속방정식과 운동량방정식을 이용하여 전개식을 적절히 연계함으로써 구하고자 하는 교차점의 수심과 유량을 산정할 수 있다.

합류점에서의 유량과 수위를 산정하기 위해 지류에서의 유입을 고려하여 운동량방정식과 연속방정식의 해를 구하였다. 연속방정식에서 유입되는 두 개의 유량을 적용하여 다음과 같이 전개하였다.

$$h_{17}^{n+1} = h_{17}^n - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \frac{1}{B_s} (Q_{18}^n - Q_{16}^n - Q_8^n) + \Delta t (S_{HS}^n + S_{HG}^n) \quad (32)$$

마찬가지로 운동량방정식의 합류점 처리는 운동량방정식의 이송가속항에 본류와 지류에서 합류점으로 유입되는 두 개의 유량을 적용하여 다음과 같이 전개하였다

$$Q_{17}^* = (1 + \alpha)^{-1} [Q_{17}^n + g A_{17} \Delta t (\frac{h_{18}^{n+\frac{1}{2}} - h_{16}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x} - i_{17})] \quad (33)$$

$$Q_{17}^{n+1} = Q_{17}^* - \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{17}^* V_{17}^* - Q_{16}^* V_{16}^* - Q_8^* V_8^*) \quad (34)$$

여기서 $\alpha = \Delta t \cdot \frac{C_{17}}{H_{17}} \cdot | V_{17}^n |$ 이다. 한편 합류점에서는 유량의 급변 때문에 불연속이 발생하여 합류점 직전에서의 연속방정식 차별화는 후방차분으로 처리하였다.

$$h_{16}^{n+1} = h_{16}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{B_s} (Q_{16}^n - Q_{15}^n) + \Delta t (S_{HS}^n + S_{HG}^n) \quad (35)$$

하천흐름은 특히 급사면인 경우 유량 확보를 위해 설치한 수중보나 자연적으로 형성된 저류지로 인해 수면 경사나 에너지 경사가 지형 경사보다 완만한 것으로

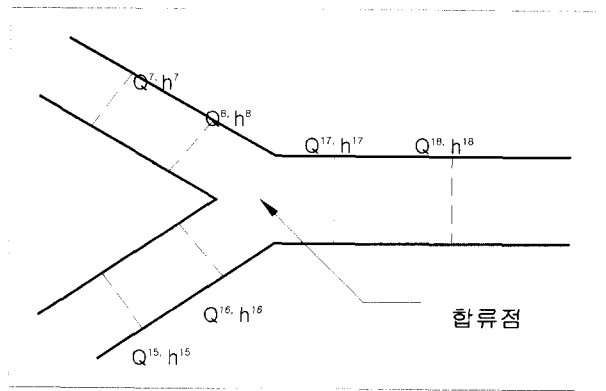


그림 5. Non-Staggered Mesh System을 이용한 합류점 모형도

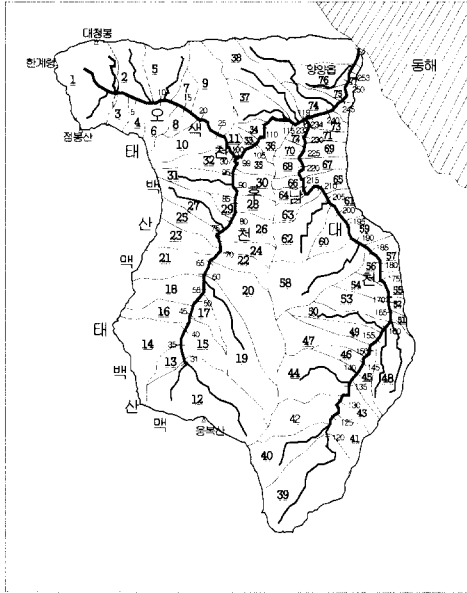


그림 6. 양양 남대천 유역의 소유역 구성도

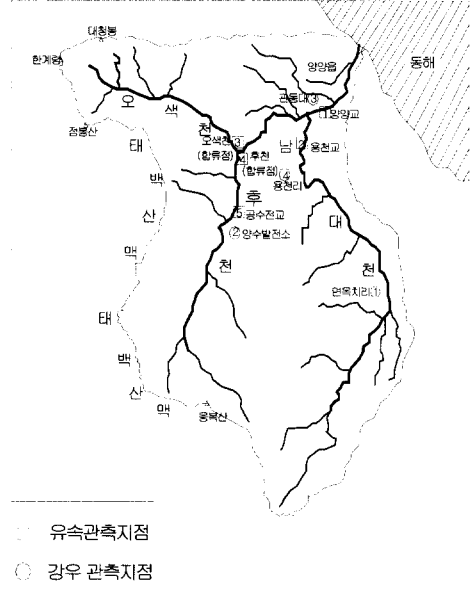


그림 7. 양양 남대천 유역의 관측 지점도

로 나타나고 있다. 본 연구에서는 수중보나 자연 저류지로 인한 흐름의 영향을 식 (20)의 셋째항에 가중치 (γ)를 부여하여 고려하였다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + \gamma g A_R \left(\frac{\partial h}{\partial x} - i \right) + \frac{C}{H} |VQ| = 0 \quad (36)$$

여기서 $\gamma < 1$ (수면경사 < 지형경사)이다.

3. 모형의 적용

본 연구에서 개발한 통합 수문-수리 해석용 수치모형을 [SIRG]라 칭하였으며, [SIRG]모형의 검증을 위하여 양양 남대천유역을 시험유역으로 선정하였다. 현장관측을 7월 10일 이후 2개월간 수회 실시하였는데, 그 기간중 최대강우가 내린 8월 1일에서 3일까지의 관측 자료를 적용하여 모형 검증을 실시하였다. 시험유역인 양양 남대천유역을 그림 6에 제시된 바와 같이 유역 수계에 따라 77개의 소유역으로 나누어 각 소유역에서의 지표면 유출을 하천 각 구간별 측방유입량으로 고려하여 해석하였다. 그림 7에 제시된 유량 관측지점과 강우관측지점은 남대천 본류에 위치하고 있으며 강우관측은 3개 지점에서 자기식 강우관측기를 이용하여

관측하였다. 하천 수위관측은 5개 지점에서 실시하였는데 4개 지점에서는 목측으로 10여회 관측하였으며 1개 지점(용천교)에서는 자동수위관측기를 이용하여 10분간격으로 강우시 2일 이상 관측하였다.

본 관측자료의 모형 적용은 남대천유역 3개의 강우관측자료를 남대천 본류유역, 후천유역, 오색천유역으로 분할하여 적용하였다. 남대천 본류의 상류와 중류유역은 면옥치리 강우관측자료를 사용하였으며, 후천유역은 양수발전소 강우관측자료를 사용하였다. 또한 오색천유역과 본류 하류유역은 관동대학교 관측자료를 사용하였다. 남대천 유역은 대부분 자연형 하천으로 정비가 되지 않아 하천 단면 형상이 불규칙하나, 모형 적용의 단순화를 위하여 본 모형에서는 하천 단면형상을 제형으로 가정하였다.

지표면 유출은 강우시 토양상태에 의해 초기 유출곡선 형상이 다르게 나타나며 강우가 지속될수록 토양내 보유 수량의 증가로 유출이 증가한다. 따라서 지표면 유출 해석시 토양상태의 고려는 초기 유출 산정시 매우 중요한 부분을 차지한다. 그림 8에 제시된 용천교 지점과 같이 유출 해석시 토양의 상태에 따른 침투율 변화를 고려하지 않고 적용할 경우 초기 강우시 유출 곡선 형상이 그림 8에 제시된 용천교 지점의 상류에 위치한 면옥치리 강우관측자료의 형상과 비슷하게 나

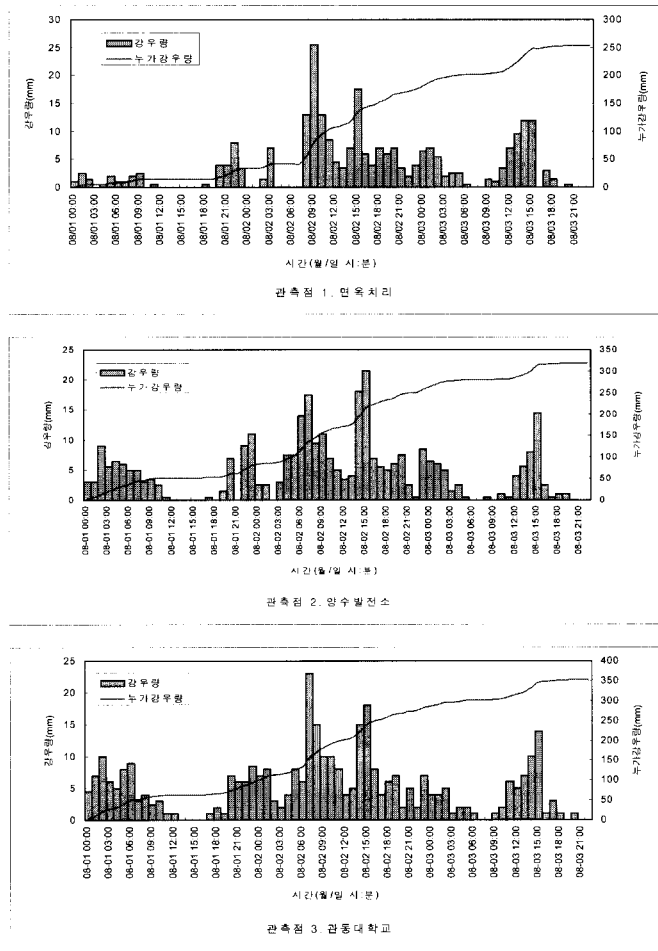


그림 8. 3개 지점의 강우관측자료(강우량과 누가강우량)

타난다. 즉 침투율의 변화를 고려하지 않을 경우 강우 초기에 유효강우가 크게 나타나 유출량이 과대 산정된다. 본 연구에서 제시한 도달시간 산정시 침투율의 변화를 고려하지 않은 유효강우를 적용할 경우 도달시간이 짧게 나오며 침투유량은 과대산정되는 경향이 발생한다.

강우 초기 침투율 변화의 고려는 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 그림 10에서 제시된 바와 같이 관측점

에서의 관측 자료와 비교하여 전 시간대에 걸쳐 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 강우 초기에는 대부분의 강우가 지표면으로 침투하여 지표면유출이 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 1~2시간 정도의 시간차가 발생하였다.

4. 결 론

본 연구에서 개발한 [SIRG]모형은 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 있는데 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하고자 지표면유출 해석시 유역면적에 따른 유역계수와 수문곡선의 형상에 따른 형상계수를 도입하였으며 침

투를 고려하여 초기의 급격한 상승을 제거하였다. 또한 도달시간 산정에 있어 지형학적 특성 외에 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 유출량

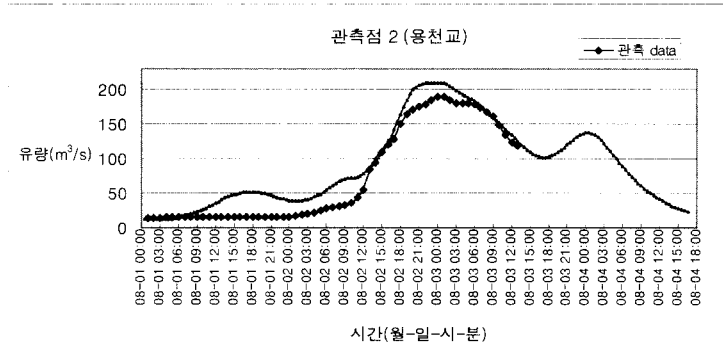


그림 9. 침투를 고려하지 않은 하천유출변이 (용천교 지점)

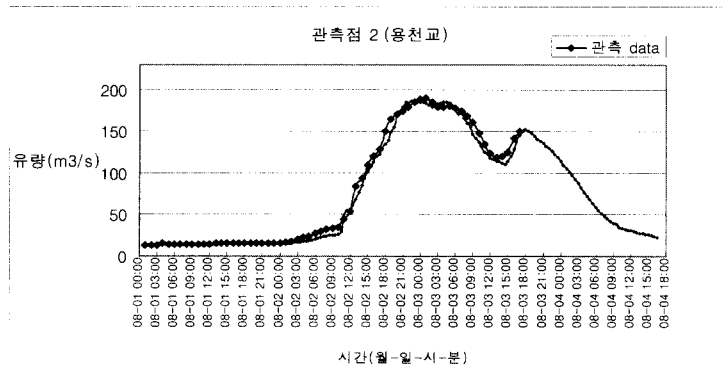
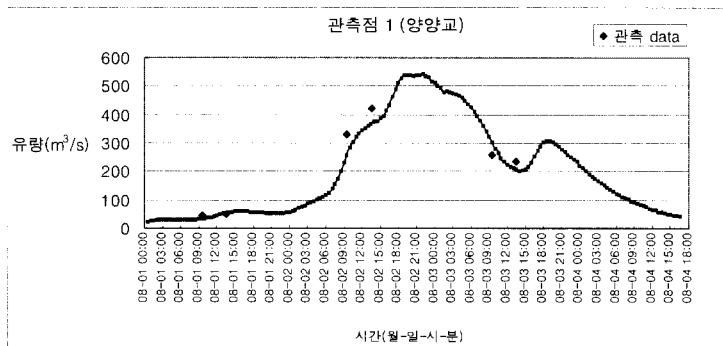


그림 10. 침투를 고려한 하천유출의 시간변이

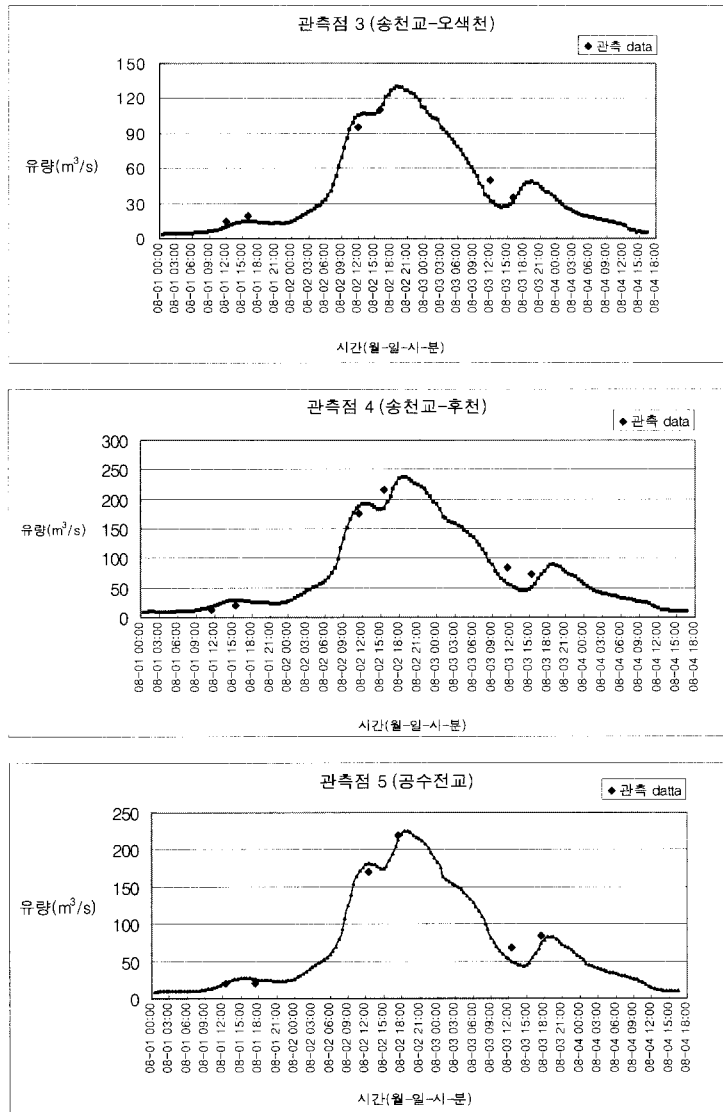


그림 10. 침투를 고려한 하천유출의 시간변이(계속)

은 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 홍수 예경보를 수행할 수 있다. 또한 자연형 하천특징을 반

영하기 위해 사행하천의 굴곡부에 따른 가중치를 마찰 계수에 적용하였으며 수공구조물이나 자연 저류지의 영향으로 인한 흐름변화를 지배방정식에 고려하였다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

건교부 (1988). 한국 확률강우량도 작성, 수자원 관리기법 개발 연구조사보고서.

Horton, R.E. (1940). "An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity." *Soil Science Society of America*, Vol. 5, pp. 399~417.

David, H.P. and Russell, G.H. (1974). "Independent comparison of three urban runoff models." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 100, No. 7, pp. 995~1009.

Hydrologic Engineering Center (1990). *HEC-1 flood hydrograph package, program user's manual*, U.S. Army Corps of Engineers,

Davis, California.

Hydrologic Engineering Center (1997). *HEC-HMS user's manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.

Hydrologic Engineering Center (1997). *HEC-RAS user's manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.

Singh, V.P. (1976). "Derivation of time of concentration", *Journal of Hydrology*, Vol. 30. pp. 147~165.

Tom, A. and Apelt, C.J. (1961). *Field computations in engineering and physics*. Van Nostrand, New York.

(논문번호:00-067/접수:2000.10.13/심사완료:2001.03.07)