

하천유역의 유사량 산정 및 하상변동 예측을 위한 영향인자의 평가 분석

Estimation of Sediment Transport and Influence Factor for the Prediction of Riverbed Changes

윤 세 의* / 이 종 태* / 정 재 욱**

Yoon, Sei Eui / Lee, Jong Tae / Jung, Jae Wook

Abstract

The feature of this paper is (1) to analyze the characteristics of rainfall-runoff relationship with kinematic wave theory, (2) to study the computational model to estimate the sediment yield, (3) to analyze the effects of bed change by transport formulas and the number of watershed division, and (4) to verify the model application with observation of channel data and measurement of rainfall, runoff, sediment discharge in Pyung-Chang River Basin. The calculated time of concentration of peak discharge occurred little earlier than the actual, but the tendency of hydrograph coincided with observation. The shape of sediment hydrographs was similar to the water hydrograph. Based on above results, the applicability of the model was verified in detail. As the number of watershed division increased, the difference between the measured runoff and sediment values and the estimated ones decreased. The result of calculation with Yalin's formula for surface and Acker-White's one for channel gave the best agreement with the measured data among the six selected sediment transport formulas.

요 지

본 연구에서는 (1) 운동파 이론에 기초한 강우, 유출 특성을 파악하고, (2) 강우 및 유수에 의해서 발생하는 침식, 퇴적량을 산정하는 모형을 연구하며, (3) 유사량 산정식, 유역의 분할수 등이 하상변동 예측에 미치는 영향을 분석하고, (4) 평창강 유역에서 하도자료, 강우, 유출량, 유사량 등을 실측하여 모형의 적용성을 검증하였다. 운동파 방정식을 평창강 유역에 적용하여 유출해석을 실시한 결과, 침투 유량의 발생시간은 다소 빠르게 계산되었으나 전체적인 수문곡선의 형태 및 크기에 있어서는 비교적 실측치에 접근하고 있었다. 유사량 곡선은 유출수문곡선에 따라 변화되며, 실측치와 계산치는 비교적 일치하고 있어서 모형의 적용성을 확인할 수 있었다. 유역의 분할 소유역 갯수를 증가하여 유출량 및 유사량을 계산하는 것이 실측치에 더욱 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 6 개의 유사량 산정공식 중 지표면에서는 Yalin 식을, 하도에서는 Acker-White 식을 적용하여 계산한 결과치가 실측치에 가장 가까운 결과를 얻을 수 있었다.

Keywords: sediment load, sediment transport, flood discharge, sediment transport formulas

* 경기대학교 토목공학과 교수

** 경기대학교 대학원 박사과정

1. 서 론

침식 및 퇴적현상은 주로 강우 충격력과 유수 소류력으로 부터 발생하며, 홍수시 운반된 토사가 범람하여 비옥한 표토를 덮게 되는데, 하천수로내에 퇴적되면 하천의 홍수 소통단면을 감소시켜 홍수범람의 규모를 더 크게 하며, 최근 도시화 지역의 증가로 공사기간 중에 발생하는 유사 역시 하수도 매물의 원인이 되기도 한다.

운동파(kinematic wave)에 관한 연구는 하도 및 지표면 흐름을 예측하기 위해 폭 넓게 사용되어 왔다. 이 방법은 복잡한 자연현상을 설명하기 위해 단순한 가정을 실제 유역에 적용한다. 그 결과는 자연 현상을 비교적 잘 해석하고 있으며, 이는 많은 관측결과에서 증명되고 있다(Rovey와 Woolhiser, 1977). 미국 농업연구소(ARS)는 운동파 이론을 적용하여 강우로 부터 발생하는 유출현상과 유사량 산정 및 하상고 예측이 가능한 KINEROS 모형(Woolhiser 등, 1990) 을 제안한 바 있다. 특히, 하도를 중심으로 좌, 우측에 위치한 지표면 유사량을 포함하고 있으며, 여기에는 토양손실공식(USLE)에 의해 표시되는 계수를 이용한다. 본 연구에서의 기본적 이론은 이 모형에 근거한다.

국내에서는 1970년대 유사량 산정에 관한 연구가 시작되었으며(남선우, 1977), 1980년대에 이르러 이에 관한 연구는 다양하게 전개되어 왔다. 이남주(1989)는 IALLUVIAL 모형을 한강 하류부에 적용하였으며, 유관규와 우효섭(1993)은 대형댐 하류의 하상변동 예측을 위해 HEC-6(HEC, 1991) 를 적용한 바 있다. 이종태 등(1993, 1994)은 KINEROS 모형에 관한 일반적인 특성을 분석하였다. 최근에 이재수와 윤용남(1995)은 한강 인도교에서 광진교까지 하상변동에 관한 연구를 위해 CHARIMA 모형을 사용하였고, 백중철 등(1995)은 동일 모형을 한강에 적용하여 하상변동을 고려한 안정하도에 관한 연구를 수행한 바 있다. 그러나 국내에서는 현재까지도 하상변동을 예측하는데 필요한 실측자료가 부족하여 연구가 크게 진척되지 못하고 있으며, 더우기 중·소 규모의 하천에서 호우기간 중의 시간별 유량 및 유사량의 실측자료는 극히 제한되어 있는 실정이다.

본 연구에서는 유출량 및 유사량을 산정하는 기본 해석모형인 KINEROS 를 분석하고, 평창강 유역에서의 강우, 유출량 및 유사량 등의 수문, 수리자료의 실측을 통하여 하상변동을 예측하는 과정에 있어 결과치에 영향을 미치는 주요 인자들의 영향을 평가, 분석한다.

2. 강우-유출 해석

지형의 식생, 피복형태에 따라서 적절한 차단깊이를 설정하여 침투를 계산하기 전에, 차단에 의한 감소 강우깊이를 계산하였으며, 침투현상은 강우 중의 침투와 강우가 감소할 때의 침투 그리고 강우가 종료된 후 다음 강우시 까지의 침투능의 회복 등으로 나누어서 구성하였다. 강우율이 침투능을 초과하고 물이 표면장력 효과를 극복하고 지표면에 고일 때, Horton 의 지표류 계산방법을 적용하였다. 미시적 입장에서 보면 지표면 유출은 매우 복잡한 3차원 과정이지만, 거시적 입장에서 보면 단위면적당 저류량과 관련되는 1차원 흐름으로 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + amh^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x, t) \quad (1)$$

여기서 t 는 시간, x 는 흐름방향의 거리, $q(x, t)$ 는 측방유입량이고, a, m 은 저류량 산정계수이다. 지표면 상단에서부터 유출이 시작된다면 이때의 상류경계조건은 식 (2)와 같다.

$$h(0, t) = 0 \quad (2)$$

유출에 영향을 주는 소유역이 지표면 상류에 존재한다면, 상류에 존재하는 소유역의 하류경계조건과 현재 계산되고 있는 소유역의 상단부 경계면에서의 유량은 같다고 가정하여 상류경계조건은 식 (3)과 같이 표시할 수 있다.

$$h(0, t) = [\alpha_u h_u(L, t)^{m_u} W_u / (aW)]^{1/m} \quad (3)$$

여기서 $h_u(L, t)$ 는 현재 계산되고 있는 지표면으로 유입되는 다른 소유역의 하류단에서의 저류깊이이다. α_u, m_u, W_u 는 저류량 산정계수들과 유역의 평균폭이고, a, m, W 는 현재 계산하고 있는 유역의 특성값이 된다.

하도 유출을 계산하기 위하여 사용된 연속방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_c(x, t) \quad (4)$$

여기서 A 는 단면적, Q 는 하도유량, $q_c(x, y)$ 는 하도의 단위깊이당 측방유입량이다. 하도에 대한 운동파 방정식은 4점 음해법(implicit method)을 사용하여 해석한다.

3. 유사량 산정

3.1 강우침식

강우침식 계산에는 강우량과 토양손실공식(USLE)에 의해 표시할 수 있는 계수, 유수 깊이가 증가함에 따라 발생할 수도 있는 강우침식에 대한 축소변수 등을 고려하였다(Meyer와 Wischmeier, 1969). 상류경계농도를 고려하여 식 (5)을 사용하였다.

$$g_s = \begin{cases} c_f k(h) r q & ; q > 0 \\ 0 & ; q < 0 \end{cases} \quad (5)$$

여기서, g_s 는 강우침식량이고, r 은 강우량이며, q 는 측방유입량, $k(h)$ 는 유수깊이가 증가함에 따라서 강우침식의 축소를 나타내는 계수이다. 이 값은 강우침식에 영향을 끼치지 않을 정도의 깊은 흐름에 대해서는 '0', 유출이 있기 전의 상태에서는 '1.0' 으로 나타낸다.

강우침식계수(c_f)는 지표면으로 부터 이탈하는 입자 특성을 나타내는데 중요한 역할을 한다. 얇은 흐름에서의 침식력은 유수력보다도 雨擊(splash)에 영향을 받을 경우가 생긴다. 이때는 이송능력이 없이도 지표면으로부터 剝離하는 경우가 종종 발생한다. 따라서, 본 연구에서도 토양의 침식성, 지표면 상태 등에 반응하는 계수로써 c_f 를 적용하였다(Smith, 1982).

3.2 유수침식 및 퇴적

흐름조건(속도, 수심, 경사 등)이 일정하다면, 임의 점에서의 유사농도는 기준이 되는 농도(평형유사농도)를 설정하고, 이로부터 현재 농도 사이에서 발생하는 차이에 따라 선형적으로 계산된다. 유수침식은 식 (6)과 같이 표시할 수 있다.

$$g_h = c_g (C_{mx} - C_s)A \quad (6)$$

여기서 g_h 는 유수침식량이며, c_g 는 이송계수이고, C_{mx} 는 유사량 산정식에 의한 평형유사농도, C_s 는 현재의 시간단계별로 구해지고 있는 농도이다(Woolhiser 등, 1990). 평형유사농도는 이송계수와 더불어 유수침식에서 중요한 역할을 한다. $C_{mx} > C_s$ 이면 침식이 발생하고 $C_{mx} < C_s$ 이면 퇴적이 발생하므로, C_{mx} 는 평형유사농도의 개념을 포함하고 있다. 평형유사농도는 유사량 경험식으로 부터 계산되며, 이로부터 산정된 평형유사농도는 수리특성치와 총침식량(강우침식 + 유수침식)을 포함한 질량평형방정식에 적용된다.

이 과정에서 각 시간 단계별로 현재의 유사농도를 계산한 후, 평형유사농도를 현재 유사농도와 비교함으로써 침식 및 퇴적을 판별하게 된다. 일반적으로 그 적용성을 높이 평가 받고 있는 Acker-White(1973), Englund-Hansen(1967), Kilinc-Richardson(1973), Meyer-Wischmeier(1969), Yalin(1963), Yang(1973)의 6 개 유사량 산정공식을 선택하여 적용하였다(Alonso 등, 1981; Julien과 Simons, 1985).

4. 유사이송

임의 점의 유사운동을 설명하기 위해 사용된 기본방정식은 식(7)과 같이 운동과 흐름의 연속방정식에 침식량(e)의 항이 포함된 질량평형방정식이다(Bennett, 1974).

$$\frac{\partial}{\partial t} (AC_s) + \frac{\partial}{\partial x} (QC_s) - e(x, t) = q_s(x, t) \quad (7)$$

여기서 C_s 는 유사농도, A 는 유수단면적, e 는 총침식량, q_s 는 하도의 측방유수유입량이다. 식 (7)의 계산과정은 먼저, 한 차분시간대에서 유속, 수심 등의 유수성분들을 먼저 계산하고, 이 결과를 이용하여 다음 시간대로 넘어가기 전에 유사의 이송을 계산한다. 즉, 유수의 연속방정식을 4점 음해법과 반복법(Newton's method)을 이용하여 먼저 계산하고, 이를 기지값으로 하여 농도를 계산한다.

강우가 빗방울 침식을 발생시키는 동안에 유출이 시작된다면, 상류에서의 강우침식에 대한 유사농도(C_s) 초기값이 존재하게 된다. 초기 유사농도는 지표면 저류가 발생할 때, 식 (7)을 단순화 시켜서 유도할 수 있다. 즉, 지표면인 경우, 상류경계에서는 거리(x)에 대한 변화가 없으므로 유수침식은 발생하지 않게 되며, 측방 유사유입량 역시 무시할 수 있기 때문에 유수침식을 제외한 강우침식만의 항으로 식 (8)과 같이 표시할 수 있다.

$$C_s (t = t_p) = \frac{c_f r q}{(q + w)} \quad (8)$$

여기서 q 는 측방유입량이다. 단일 유역에서 상류경계의 유사농도 $C_s(0, t)$ 는 식 (8)과 동일하다. 하도에 대한 상류경계조건 역시 식 (7)에 의해서 유도할 수 있다. 하도에서는 강우침식의 영향이 미약하고 상류경계에서의 거리에 대한 변화량을 무시할 수 있기 때문에, 측방 유사유입량을 고려하여 식 (9)와 같이 표시된다.

$$C_s(0, t) = \frac{q_s}{q_c + w B_w} \quad (9)$$

여기서 B_w 는 하도의 저면 폭이고 q_c 는 측방유입량이다.

5. 평창강 유역에 대한 적용 및 결과분석

5.1 유역자료 조사

평창강 유역의 1/25,000의 지형도를 참조하였으며, 실측을 위한 예비답사를 실시하였다. 방림 수위관측소에서, 시간별 수위관측 및 부유사 채취를 병행하였다. 아울러 유속, 경사, 하도단면 등을 측정하였으며, 주요 지점별로 하상토를 채취하였다.

5.1.1 유역 특성

이 유역은 최고봉인 계방산(해발표고: 1577.4 m)에서 발원하여 남한강으로 유입되는 남한강의 상류에 위치한 지류로서 상류로 부터 홍정천, 속사천, 대화천 그리고 본류로 구성되어 있고, 방림 수위관측소 상류의 유역면적은 약 527.83 km²이다(그림 1).

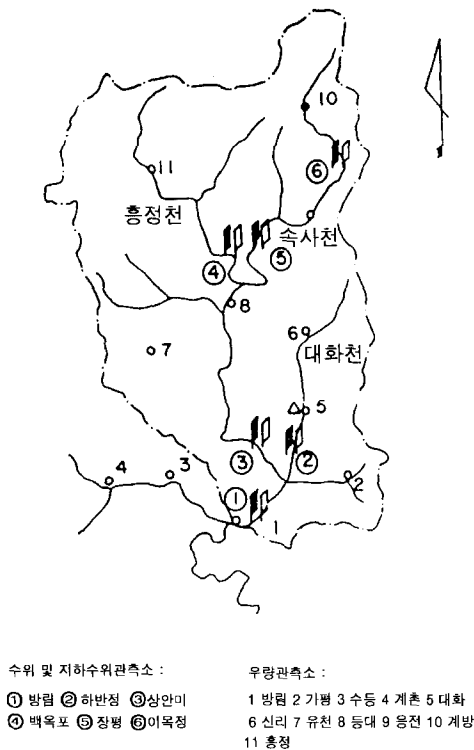


그림 1. 평창강 유역도

Horton의 교선법에 의한 유역 평균경사는 0.333 rad이며, 하천경사는 상류가 매우 급하나 하류로 가면 다소 완만하다. 상방림지점에 대한 유역형상계수는 $F=0.196$ 으로서 비교적 장방형에 속한다(건설부, 1982). 본 연구에서는 유역의 최하류단 수위관측소의 위치를 고려하여 평창읍과 대화면 사이에 위치한 방림 수위관측소의 상류유역을 검토 대상유역으로 정하였다.

5.1.2 수문특성

평창강 유역내에는 IHP 사업에 의거 11 개 강우량 관측소가 설치되어 1981년 10월부터 운영되고 있다. 기상청 관측소는 설치되어 있지 않으나, 유역의 동쪽 경계에 위치한 대관령 측후소와 유역 남부의 평창군 농촌지도소에서 강우량과 기온 등의 기상자료가 관측되고 있으므로 이를 이용할 수 있었다.

유역내에 불균등하게 분포하는 지점 강우자료는 소유역 별 면적우량으로 환산치리가 필요하며, 본 연구에서는 2 가지 방법을 사용하였다. 먼저, Thiessen 망을 구성하여 소유역내 공간적으로 일정한 면적 강우자료를 구했으며, 두번째는 등우선도를 참고하여 점우량(point rainfall)을 면적우량으로 표현하였다. 즉, 지금까지 수집된 등우선도를 참고하여, 소유역 중심에서 예측할 수 있는 강우량과 이에 가장 근접한 지점 강우자료의 비율로 가중인자를 산정하였다. AMC-II 조건에서의 평균 유출곡선지수(CN)는 67.2 인 것으로 나타났으며, 미국 토양보존국(SCS)에서 제안한 절차에 의해 AMC-I과 AMC-III 조건에서의 CN은 각각 49.6과 80.7로 발표되었다(윤석영 등, 1991). 평창강 유역에 발생한 연평균 강우량은 1380mm이며, 같은 기간 동안의 전국적인 평균치보다는 훨씬 많다. 그 동안 관측된 일 최대우량은 363.0mm이다.

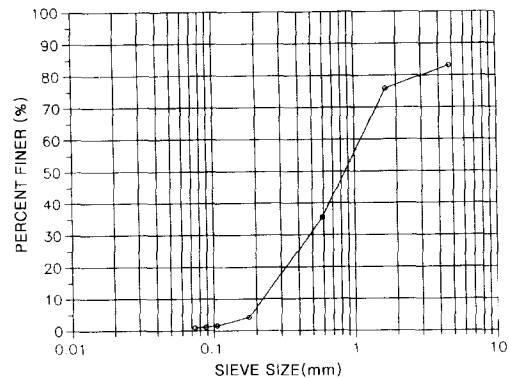


그림 2. 하상토 입경분포곡선(상안미)

5.1.3 하도자료의 수집

하상도는 먼저, 대상유역 하류단인 방림지점에서 출발하여 하반기와 상안미, 백옥포, 장평, 속사천, 이목정, 이승복 기념관 부근의 순서로 채취하였으며, 하상단면 전체의 하상도 분포를 대표할 수 있도록 하도 단면을 좌, 우측 및 중앙으로 구분하여 시료를 채취한 후 평균하였다.

하천의 횡단면은 대상 유역내에서 수위계가 설치된 이목정, 장평, 백옥포, 상안미, 하반기, 방림 지점을 선정하여 평균하폭을 측정하였다. 하도가 비교적 직선이고, 유속이 급격히 변하지 않으며, 하도가 급속소 또는 급확대되지 않는 하도구간에서 수면경사를 측정하였으며, 유속계 및 부표에 의한 유속측정을 병행하였다.

5.1.4 유사량 관측

홍수량 및 하천유사를 채취하기 위하여 사전답사를 실시한 후 측정지점을 방림의 舊橋로 선정하였다. 舊橋는 일제시대에 만들어져 현재에 이르고 있는데, 현재는 차량통행이 금지되어 있어서, 차량을 상주시켜 놓고 관측하는데 위험이 없을 것으로 판단하였다. 부유사 측정을 위하여 횡단면을 3 개의 부분 단면으로 나누고, 각 구간에 위치한 측정선상의 5 개 점에서 시료를 채취하여 유사의 연적분포상의 평균 부유사 농도, 유사 입경 분포, 비중, 수온 등의 물리적 특성을 측정하였다. 유사량 측정장비로는 크게 수심적분 채취기와 점적분 채취기로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 점적분 채취기와 유사한 장비를 제작하였다(그림 3). 하상으로 부터 다리위까지 연결시킬 수 있는 버팀대를 사용하였으며, 버팀대는 직경 2.7 cm, 길이 2 m 인 상수도용 파이프 5개를 연결하여 사용하였다(그림 4). 채취펌프는 측정



그림 3. 부유사채취기



그림 4. 부유사채취 및 유속측정

지점(방림교 높이, 8 m)에도 적절히 작용할 수 있는 용량을 선택하였고, 펌프유입구는 부유 장애물 유입방지를 위해 방호장치를 부착하였다.

5.1.5 실험 분석

수집된 하상도 시료는 먼저 건조로(약 110 °C)를 사용하여 건조시킨 후 총중량을 측정하였고, 진동기가 설치된 7 개의 체를 통과시켰다. 각 체에 남은 잔류량은 따로 측정하였으며, 누적 통과백분율을 계산하여 비교적 순조롭게 입경 분포도를 작성할 수 있었다. 부유사 농도를 결정하기 위해 여과법을 사용하였다. 사용된 장비는 하상도 분석장비에 여과지, 저울(0.01 g 정밀도) 등을 추가하였다. 여과된 시료를 건조시킨 후 부유사 무게를 측정하였으며, 평균 부유사 농도는 'ppm' 단위로 환산하여 그 중 일부를 표 1에 나타내었다.

시간별로 채취한 시료는 총 167개이었고, 호우가 특히 심했던 4 일(94년 6월 30일~7월 3일) 간에는 106 개의 시료를 수집할 수 있었다. 분석결과 지점별 평균강우가 발생한지 37 시간 후(7월 1일 16시)에 최대 농도값을 나타냈으며, 이는 유출량의 첨두유량값이 도달하는 시간과 거의 일치하고 있다. 강우초기(6월 30일 04시~

표 1. 부유사 농도분석

일 시	유량 (m ³ /s)	건조시료 (g)	총시료 (g)	부유사농도 (ppm)
94. 6.30 21:00	115.37	0.212	1279.9	166
23:00	124.39	0.256	1326.1	193
7.1 08:00	272.53	0.634	1196.1	530
10:00	464.60	0.921	1287.1	716
14:00	533.58	1.265	1145.9	1104
16:00	718.61	1.514	1210.9	1250
19:00	562.51	0.957	1023.7	935
7.2 01:00	344.77	0.613	1297.3	473
06:00	180.06	0.252	1012.1	249
10:00	129.03	0.239	1288.2	184

표 2. 총유사량산정을 위한 입력자료

입경 (i)	입경범위(mm)	기하평균 (mm)	부유사 분포(%)	하상도 분포(%)	침강속도(w)
1	0.0014~0.062	0.011	58.8	1.2	1.125×10 ⁻⁴
2	0.062~0.125	0.088	17.9	8.9	0.00685
3	0.125~0.25	0.177	11.8	12.1	0.0218
4	0.25~0.5	0.354	5.9	11.2	0.0475
5	0.5~1.0	0.707	4.1	18.3	0.0795
6	1.0~2.0	1.414	·	17.8	0.119
7	2.0~4.0	2.828	·	11.8	0.173
8	4.0~8.0	5.657	·	3.6	0.246

12시)의 채취시료는 시료당 포함되어 있는 부유사의 농도가 극히 미소하여 제반 여건상 실험분석이 곤란하여 이를 제외시켰다.

실측된 시간별 수위를 이용하여 유량을 산정하였고, 계산된 부유사 농도를 유량에 곱해줌으로써 부유사량을 계산하였으며, 수정 아인쉬타인 방법을 적용하여 총유사량을 산정하였다(우효섭과 유권규, 1990). 총유사량 산정을 위한 입력자료는 표 2와 같다.

5.2 결과 분석

평창강 대표유역의 실제 강우조건을 적용하여 민감도 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 계산 시간간격(Δt) 및 시간가중치(θ)가 입력변수이며, 분할거리(Δx)는 하상변화를 고려하여 결정하였다. 부정류 방정식은 한 강우사상에서 시간에 따른 수위증가로 Cx (courant no) 이 변화하므로 관계식은 비선형 방정식이 된다. 본 연구에서는 Δt 를 10(min), 30(min) 으로 나누고, 시간 가중치(θ)를 0.6~0.9까지 0.1 씩 증가시키며 관찰하였으며, 그 결과 $\Delta t=30$ (min) 인 경우는 θ 가 커짐에 따라 침투유량이 감소하며, 시간이 흐를수록 약간 증가하지만, 큰 영향은 미치지 않는 것으로 나타났다. $\Delta t=10$ (min) 인 경우는 $\Delta t=30$ (min) 에 비해서

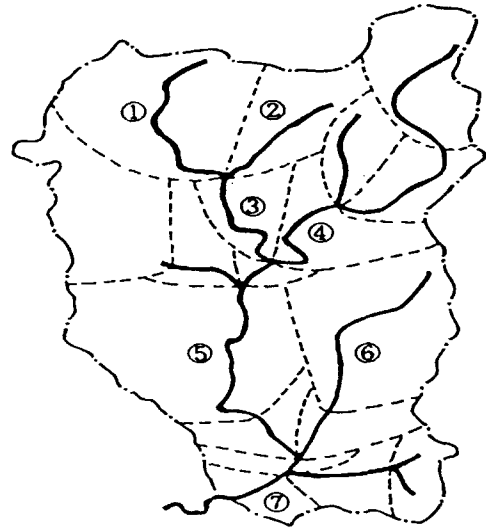


그림 5. 평창강 유역분할도(50)

변동폭이 감소하고 있었다. 따라서, 시간간격(Δt)은 10(min)을 적용하였다.

평창강 유역의 소유역 분할 갯수를 18 개와 50 개의 2 가지로 구분하여 모형의 적용성을 검토하였다(그림 5). 평창강 최하류단인 상방림 지역에서 실측(1994. 6~7)한 강우조건을 적용하여 유출해석을 실시한 결과는 그림 6 과 같다.

실측치는 강우발생 후 7월 1일 02:00시에서 유출량이 다소 감소하며, 이후 증가하다가 12:00시 부근에서 약간 감소하고 16:00시 부근에서 침투유량이 나타났다. 그리고 다시 감소하여 7월 2일 04:00에서 약간의 증가 추세를 보이며 이후 감수곡선을 그리고 있는데, 이는 우량정상도의 형태를 잘 재현해 주고 있다. 유출량의 증감양상은 분할 소유역에 관계 없이 비교적 잘 일치하고 있으나 분할 소유역의 수를 증가시킬때 실측치에 더욱 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 소유역을 18 개로 분할한 경우에서의 침투유량 도달시간은 실측치에 비해 3 시간, 50 개로 나누었을때는 2 시간 빠르게 나타났다.

침투유량은 분할 소유역 18 에서 790 cms, 분할소유역 50 의 경우는 750 cms로 계산되었다. 이는 관측치에 비해 각각 10%, 4.6% 의 오차를 나타내고 있다. 즉, 침투유량의 크기와 도달시간은 분할소유역의 수를 증가시킨 경우가 실측치에 더욱 접근하고 있었다. 본 연구에서는 운동과 이론에 근거하여 유출 및 유사량을 산정하고 있는데, 운동과 방정식의 초기가정에 마찰항을

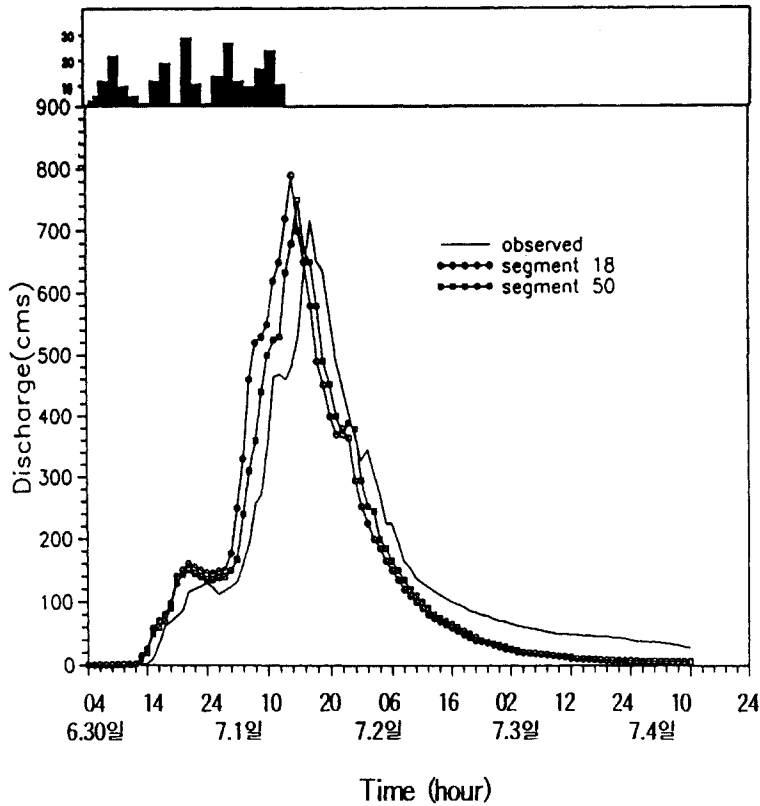


그림 6. 유출수문곡선(상방림 지점, 94, 7)

단순화시킨 요인이 도달시간을 실측치보다 단축하고 침투유량을 증가시킨 것으로 생각된다. 또한, 수치모형에서는 분할 소유역이 많아 질수록 지형인자의 도입으로 유역 기하특성치의 누적오차가 발생할 수 있다. 하지만, 평창강 유역에서는 하도 만곡부가 다수 포함되어 있고, 모형의 입력자료는 만곡부를 직선으로 근사하게 된다. 따라서, 분할 소유역의 개수가 작아질수록 도달시간이 빠르게 산정된 것으로 생각된다. 앞으로 유출수문곡선 추정에 사용된 계수들이 국내여건을 충분히 고려하여 연구되어 진다면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

분할 소유역의 개수와 6 개의 유사량 산정식의 선택에 따라 유사량 변화를 분석하였다. 지표면과 하도에 동일한 유사량 산정공식을 적용할 경우, 실측치와 계산치의 오차가 너무 크기 때문에 6 개의 유사량 공식을 지표면과 하도에 각기 따로 적용하여 총 36 조건으로 구분한 후 실측 유사량과 비교하였다. 표 3~4 는 비교적 실측치에 접근할 수 있었던 3 가지 유사량 산정식의 결

과를 분할 소유역별로 나타낸 것이다. 지표면에서는 Yalin 식을, 하도에서는 Acker-White 식과 Engelund-Hansen 식을 적용한 결과, 비교적 관측치에 접근할 수 있었으며, 그 외의 공식들은 심한 오차를 나타냈다.

표 3. 침투유사량(분할소유역, 18)

구 분	지표면		하도		관측치
	M-W	E-H	Yalin	E-H	
침투유사량 (104tons/day)	25.79	6.71	11.42	8.97	

*A-W(Acker-White), E-H(Engelund-Hansen), Yalin(Yalin), M-W(Meyer-Wischmeier)

표 4. 침투유사량(분할소유역, 50)

구 분	지표면		하도		관측치
	M-W	E-H	Yalin	E-H	
침투유사량 (104tons/day)	21.34	4.94	10.11	8.97	

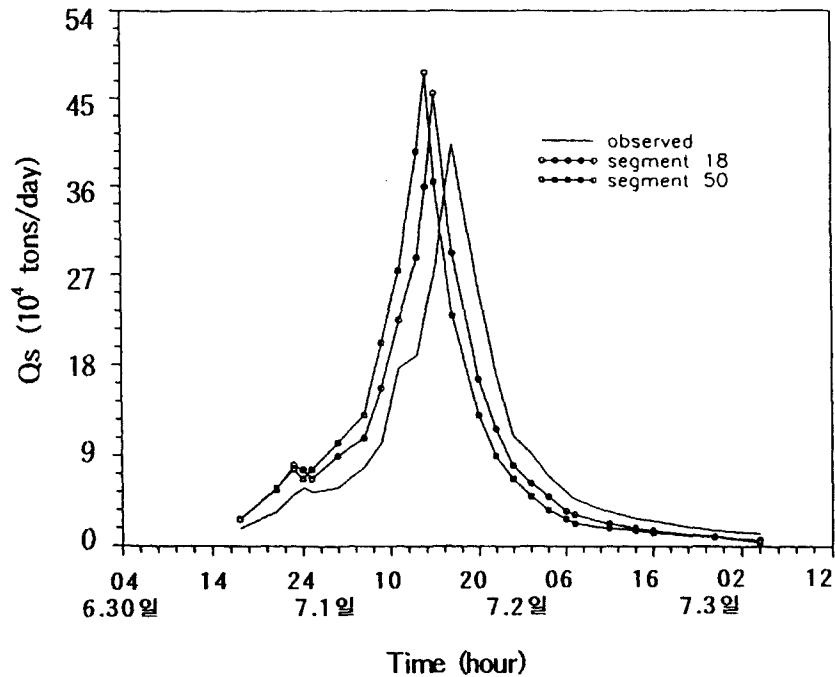


그림 7. 유사량 곡선(상방림 지점, 94, 7)

Yalin 식은 여러 학자들이 관측한 자료(Foster와 Meyer, 1972)와도 비교해 볼때, 얇은 흐름에서 비교적 좋은 결과를 보여 주고 있다. 분할 소유역에 관계없이 지표면에서는 Yalin 식을 하도에는 A-W 식을 적용하여 계산한 결과치가 실측치에 근접하였으며, 분할 소유역이 50 개인 경우가 18 개인 경우에 비해 실측치에 가깝게 계산되었다.

이는 A-W 식의 유도과정에서 적용된 입경(D_{35})은 0.04~4.94 mm 이고, E-H 식에 사용된 입경(D_{50})은 0.19~0.93 mm 인데, 본 연구에서 관측된 소유역별 하상도 입경(D_{50})범위는 0.85~2.6 mm 로써 A-W 식에 보다 근접되고 있기 때문에 판단된다.

그림 7 은 유사량 관측치를 기준으로 분할 소유역별로 지표면에서는 Yalin 식을, 하도에서는 Acker-White 식을 적용하여 계산한 결과이다. 분할소유역의 개수가 작아질수록 유사량의 침두치는 증가하며 도달시간도 빠르게 나타나고 있는데, 이는 이전에 계산된 유출량에 영향을 받고 있는 것으로 생각된다. 흐름의 복잡한 현상을 고려한다면, 실측치와 계산치는 비교적 잘 일치하는 것으로 판단된다.

또한 대부분 유사 실측자료가 부족하므로 유사량 공식

들은 폭 넓게 받아 들일 수 없는 것이 현실이다. 그러한 결과로써 유사이송 공식들이 종종 무분별하게 사용되기도 한다. 그러나 제한된 범위이긴 하지만, 유사특성 및 수리 조건들은 측정치를 고려한 것이므로 자료군의 전체적인 평균추세를 어느 정도 예측하고 있다고 판단된다. 앞으로 적용 대상유역을 다양화 시키면서 이 모형의 특성을 분석한다면 실무에 직접 적용할 수 있는 모형으로 전환시킬 수 있다고 생각된다.

6. 결 론

본 연구에서는 운동과 방정식을 이용하여 강우-유출 특성을 파악하고, 질량평형 방정식으로 부터 유사량을 산정하는 기본 해석모형을 구성하고, 국내 중, 소유역에 대한 적용성을 평가하기 위해서 평창강 유역에서 강우, 유출량, 유사량 등의 실측을 통하여 계산치를 검정하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 흐름현상에 관련된 복잡한 사항들을 고려할 때, 평창강 유역에서의 유출수문곡선의 형태 및 크기에 있어서 계산치와 실측치는 비교적 일치하였다.

(2) 평창강 유역에서의 유사량은 유출양상에 많은 영향을 받으며, 6 개의 유사량 공식 중에서 지표면에는

Yalin 식을, 하도에는 Acker-White 식을 적용하여 계산했을 때 실측치와 비교적 잘 일치하였다.

(3) 분할 소유역을 증가하여 계산하는 것이 유출수문 곡선과 유사광곡선에서 실측치에 더욱 근접한 결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1996 년도 한국과학재단 핵심전문연구비 지원(과제번호: KOSEF 961-1205-021-1)에 의한 결과이며, 지원당국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

건설부(1982, 1987-1996). 국제수문개발계획(IHP) 연구조사 보고서.

남선우(1977). 하천의 유사량과 하상변동에 관한 연구. 석사학위논문, 건국대학교.

백중철, 조원철, 허준행 (1995). "한강분류의 하상변동을 고려한 안정하도에 관한 연구." 대한토목학회논문집, 제15권, 제4호, pp. 907~915.

우효섭, 유권규 (1990). 수정아인쉬타인 방법의 한국하천에서의 적용, 연구보고서, 한국건설기술연구원.

유권규, 우효섭(1993). "HEC-6 를 이용한 대청댐 하류의 하상변동 예측." 대한토목학회논문집, 제13권, 제5호, pp. 157-163.

윤석영, 김승, 김규호(1991). 평창강유역의 수문특성 조사, 한국건설기술연구원.

이남주(1989). ALLUVIAL 을 이용한 한강 하상변화의 예측, 석사학위논문, 서울대학교.

이재수, 윤용남(1995). "한강분류의 하상변동에 관한 연구." 대한토목학회논문집, 제15권, 제4호, pp. 875-884.

이종태, 윤세의, 정재욱(1993). "소유역에서의 유출 및 유사량 산정모형 : KINEROS." 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 169-171.

이종태, 윤세의, 정재욱(1994). "하상변동 예측을 위한 유사량 산정식 및 포장계수의 영향 분석." 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 121-124.

Ackers, P. and White, W.R. (1973). "Sediment transport: new approach and analysis." *J. Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 99, No. HY11, pp. 2041-2060.

Alonso, C.V., Neiling, W.H., and Forster, G.R. (1981). "Estimating sediment transport

capacity in watershed modeling." *Transactions of the American Society Agricultural Engineers*, Vol. 24, No. 5, pp. 1211-1220.

Bennett, J.P. (1974). "Concepts of mathematical modeling of sediment yield." *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 3, pp. 485-492.

Engelund, F. and Hansen, E. (1967). "A monograph on sediment transport in alluvial streams." Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark.

Foster, G.R. and Meyer, D.L. (1972). "Transport of soil particles by shallow flow." *Transactions of the American Society Agricultural Engineers*, Vol. 15, No. 1, pp. 99-102.

Hydrologic Engineering Center (1991). *HEC-6, scour and deposition in rivers and reservoirs, user's manual*.

Julien, P.Y. and Simons, D.B. (1985). "Sediment transport capacity of overland flow." *Transactions of the American Society Agricultural Engineers*, Vol. 28, No. 3, pp.755-761.

Kilinc, M. and Richardson, E.V. (1973). *Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall*. Hydrology Paper 63, Colorado State University, Fort Collins.

Meyer, L.D. and Wischmeier, W.H. (1969). "Mathematical simulation of the process of soil erosion by water." *Transactions of the American Society Agricultural Engineers*, Vol. 12, No. 6, pp. 754-762.

Meyer, L.D. and Wischmeier, W.H. (1969). "Mathematical simulation of the recess of Soil Erosion by Water." *Transactions of the American Society Agricultural Engineers*, Vol. 12, No. 6, pp. 754-762.

Rovey, E.W. and Woohiser, D.A.(1977). "Urban strom runoff model." *J. Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 103, No. HY11, pp. 1339-1351.

Smith, R.E., Chery, D.L., Renard, K.G. and

- Gwinn, W.R. (1982). *Super-critical flow flumes for measuring sediment-laden flow*. U.S Department of Agriculture Technical Bulletin 1655.
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E., and Goodrich, D.C. (1990). *KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual*. ARS-77, U.S. Department of Agricultural Research Service.
- Yalin, Y.S. (1963). "An expression for bed-load transportation." *J. Hyd. Div., ASCE*, Vol. 89, No. HY3, pp. 221-250.
- Yang, C.T. (1973). "Incipient motion and sediment transport." *J. Hyd. Div., ASCE*, Vol. 99, No. HY10, pp.1679-1704.

〈최종본 접수일 : 1997년 9월 5일〉