

PC4 분포형모델을 이용한 지형특성변화에 따른 유출해석

심창석*, 이순탁¹

영남대학교 박사수료, ¹영남대학교 토목도시환경공학부

1. 서 론

중소하천유역의 습윤상태를 설명하는 유역의 선행수문사상으로 부터 강우유출과정에 있어 토양의 공극율, 하천의 경사 및 토양습윤상태가 강우유출계내에서 동적거동을 하는 것으로 취급하여 강우유출과정의 매개변수를 추정하고 이를 수행할 수 있는 알고리즘을 확립토록 하였다. 강우 유출계내에서 모델 매개변수의 초기치는 지형 및 토양조건 상태에 지배된다는 가정하에서 동적거동으로 취급하였으므로, 본 모델은 유역의 여러가지 특성을 나타내는 모델의 매개변수를 포함하게 된다. 따라서, 본 강우 유출모델에서 최적의 매개변수를 추정하기 위하여 기본이론을 확립하고 이를 실제에 적용토록 하였다. 본 연구를 위하여 적용할 모형은 분포형모형으로서 실제호우에 적용하여 실측치와 비교 분석토록 하였다. 본 연구에서는 유역의 토양특성, 지형 및 식생 등의 지상인자와 기상인자 등으로부터 공간적으로 변화하는 매개변수를 추정하기 위해 동질성을 고려한 다수의 격자망을 구성하여 모델의 이론과 알고리즘을 실제 호우사상에 적용하였다. 따라서, 분석 결과치의 보정을 통하여 한국지형에 적합한 AMC조건식을 제시하고, 보정된 AMC조건에 따른 AGNPS모형의 수문학적 토양피복형수(CN)와 각 매개변수의 최적화 작업을 바탕으로 모델 매개변수 추정기법을 확립하였다.

2. 강우 유출모형의 기본이론

AGNPS모형은 중대규모 유역으로 부터의 유출 및 수질과정을 규명하기 위하여 미국 농무성과 미네소타주 오염조절처(Minnesota Pollution Control Agency, MPCA)가 공동으로 개발한 호우사상에 대한 분포형 매개변수 모형이다(Young et al., 1987). AGNPS모형은 유역을 수문특성이 균일한 격자로 구분하여 이들 호우사상에 따른 각 격자들의 수문인자, 토양유실 및 수질인자 등의 성분을 계산하고, 이를 유역하구까지 추적해 대상유역의 수문특성 인자들을 구하도록 하고 있다. 모형의 주요 성분으로는 수문부분, 유사운송 및 수질부분 등이 있으며 모형은 5개의 주요 부프로그램으로 이루어져 있다. 먼저, 유역 자료와 셀(cell)별 입력자료를 처리하고 각 셀에 대해 각각의 수문, 유사, 수질 등의 성분량을 계산하며, 그 다음으로 셀에서 유하하는 유출성분량들을 계산하고, 유사는 입자크기에 따라 5개로 구분한다. 마지막으로 이들을 유역의 출구까지 추적한 후 집중흐름, 하천운송능, 유사 및 영양물질을 계산하고, 이들 계산 결과를 출력할 수 있다.

2.1. 총유출량

AGNPS모형에서 유출량은 SCS법에 의해 추정되며 다음의 식 (1)과 같다.

$$RO = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (1)$$

여기서, RO 는 직접 유출량(mm), P 는 강우량(mm), S 는 최대 잠재보유수량(mm)이다. 그리고 식 (1)에서의 잠재보유수량은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

한편, CN 은 유출곡선지수로서 유역의 토지이용, 토양종류, 수문학적 토양조건 등에 영향을 받는 값으로써 0~100의 범위내에서 산정된다.

2.2. 침투유량

강우사상에서의 침투유량은 Smith와 Williams의 경험식을 사용하여 추정하며, 식 (3)과 같다.

$$Q_p = 3.79 \cdot A^{0.7} \cdot CS^{0.159} \cdot \left(\frac{Q}{25.4} \right)^{0.903A^{1.016}} \cdot LW^{0.187} \quad (3)$$

여기서, Q_p 는 침투유량(m^3/sec), A 는 유역면적(km^2), CS 는 하천경사(m/km), Q 는 유출량(mm), LW 는 유역주연장에 대한 면적비(L^2/A)이고 L 의 단위는 km이다.

식 (3)은 유역지형인자로서 유역면적, 하천경사, 유역주장-면적비와 강우사상의 유출량을 이용하여 침투유량을 구한 것으로 유역면적이 작은 경우 식의 계수와 유역면적지수가 변화하는 경향을 갖는 것으로 발표되었다(Akan, 1985).

3. 적용 및 분석

3.1. 지형 및 지질

본 연구의 대상유역은 국제수문개발계획(IHP)에 의하여 선정되어 운영되고 있는 위천 대표유역을 선정하였다. 위천유역은 전체면적이 약 $472km^2$ 이며, 경상북도 군위군을 중심으로 하여 의성군, 구미시, 칠곡군, 대구광역시, 영천군 및 청송군으로 둘러 싸여 있다. 이 유역에는 건설교통부에서 직접 관리·운영하는 11개의 우량관측소(군위남부, 효령, 대울, 고매, 우보, 산성, 신령서부, 의흥, 화수, 화산, 석산)와 6개의 수위관측소(동곡, 고로, 미성, 병천, 효령, 무성)가 있으며 이를 유역 출구점으로 하여 유역의 경계를 구축하고 적용지점으로 선정하였다. 본 연구에 이용된 호우자료는 83년부터 97년까지 7개 강우사상이며 강우 유출모형의 매개변수 추정과 분석에 사용되었다. 다음의 그림 1, 2는 연구 대상유역의 격자망과 토양분류도를 나타낸 것이다. SCS 유출곡선지수는 토지이용 및 경작형태에 관련된 자료 이외에도 토양분류 자료를 필요로 한다. 강우 유출해석에서는 토양분류를 이용하여 소유역별로 유출해석에 필요한 CN 값을 산정하도록 되어 있다. 본 연구에서는 국립방재연구소에서 구축한 정밀토양도(1:25,000)를 분석에 적용하였다.

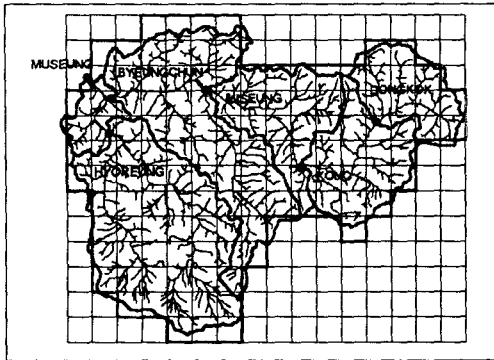


그림 1 연구대상 유역



그림 2 위천유역의 토양분류도

3.2. 실제 호우사상에 대한 적용

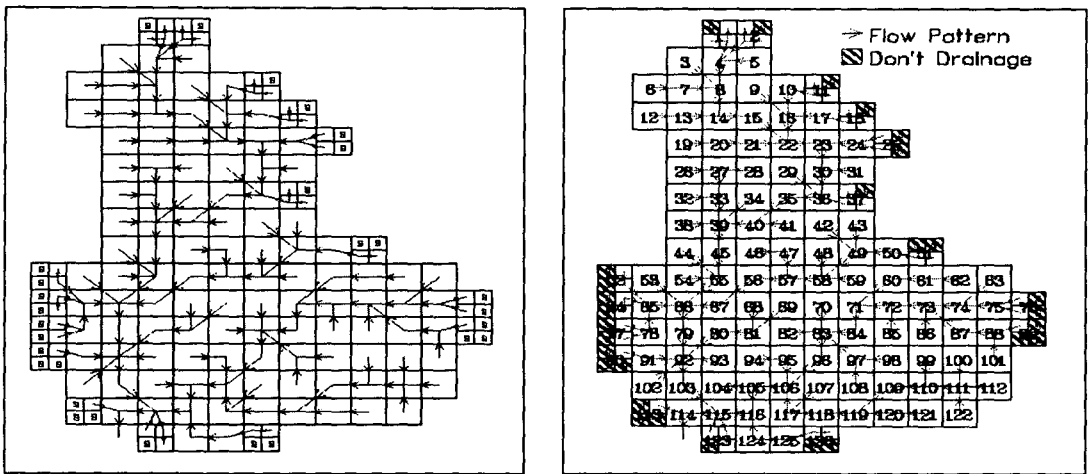
본 분석에서는 유역의 동질성을 고려하여 동곡, 고로, 미성, 병천, 효령 및 무성지점에 각각 12개, 30개, 45개, 76개, 46개 및 1265개의 조격자를 구성하였으며 하천의 수로방향 및 경사형태를 세분화하기 위하여 각 지점에 대하여 8개, 24개, 24개, 44개, 12개 및 64개의 세격자로 분할하였다. 그리고 유역 형상의 불규칙성을 고려하여 유출계산에 고려되지 않는 각 지점별 2개, 7개, 7개, 18개, 7개 및 29개의 세격자를 반영하였으며 격자에 수로방향을 도시하였다. 한편 본 분석에서 AGNPS를 이용한 모의발생 결과치가 동곡, 고로, 미성, 병천, 효령 및 무성지점에서 각각 $14.80\sim 80.18\text{m}^3/\text{sec}$, $39.24\sim 222.88\text{m}^3/\text{sec}$, $63.41\sim 446.17\text{m}^3/\text{sec}$, $102.63\sim 1234.32\text{m}^3/\text{sec}$, $55.62\sim 454.47\text{m}^3/\text{sec}$ 및 $144.27\sim 1322.50\text{m}^3/\text{sec}$ 로 분석되었다. 이는 식 (4)의 측정 유출곡선지수 CN_m 을 비교하여 각 지점에 대한 호우사상별로 상대오차가 1.0~25.0%, 4.0~27.0%, 7.0~29.2%, 2.0~23.9%, 3.0~25.0% 및 3.6~21.0%의 차이를 나타내었다. 분석결과에서 AMCⅡ조건에서는 관측치와 분석결과치가 유사하게 나타났으나 AMCⅠ조건에 대해서는 상대적으로 작은 값을 보였으며 AMCⅢ조건에서는 다소 큰 값을 보였다(김한태, 1993, 김진택, 1995 등). 따라서, 이를 보완하기 위한 수정 유출곡선지수 CN_{mI} 과 CN_{mIII} 를 식 (5)로 구성하였다. 식 (5)의 수정 유출곡선지수식의 계수 a의 결정은 a를 0.1~0.9까지 시행착오법을 거쳐 CN_m 이 측정 유출곡선지수에 가장 근사한 0.52를 적용하였으며 이를 토대로 산정된 결과치와 관측치는 거의 일치되는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 기왕에 발표된(김한태, 1993, 김진택, 1995 등)연구결과에서 유출곡선지수식의 계수 a에 대한 범위가 0.5~0.7임을 감안할 때 거의 일치된 경향을 나타내었다.

$$CN_m = \frac{25400}{254 + 5P + 10Q - 10(Q^2 + 1.25QP)^{0.5}} \quad (4)$$

$$CN_{mI} = a(CN_{scsI}) + (1 - a)(CN_{scsII})$$

$$CN_{mIII} = a(CN_{scsIII}) + (1 - a)(CN_{scsII}) \quad (5)$$

CN을 보정한 후에 AGNPS를 이용한 모의발생의 결과치를 살펴보면, 침투유량(Q_{peak})은 동곡, 고로, 미성, 병천, 효령 및 무성지점에서 각각 $14.80 \sim 80.18m^3/sec$, $38.49 \sim 222.88m^3/sec$, $63.41 \sim 446.17m^3/sec$, $109.30 \sim 1056.20m^3/sec$, $56.28 \sim 454.47m^3/sec$ 및 $160.71 \sim 1305.62m^3/sec$, 상대오차는 1.0~20.0%, 4.0~21.0%, 7.0~22.0%, 2.0~19.0%, 3.0~22.0% 및 3.6~12.0%의 차이를 나타내었다. 분석구역에서 매개변수 보정을 실시하여 AGNPS모델을 이용한 유출량의 모의 결과치는 강우에 따라 다소 차이가 있거나 관측치와 계산치에 의한 상대오차가 1~20%의 범위내에 존재하고 있어 관측치와 유사하였는데 이것은 유역의 동질성을 위해 격자망을 비교적 세분화한 것에 기인된 것으로 판단된다.



(a) Grid Network

(b) Flow path

그림 3 무성지점의 분석 격자망도

3.3. 매개변수 추정결과

본 연구에서는 AGNPS모델에 의한 유출량 산정에 있어 유출량 추정에 밀접한 관계가 있는 수문학적 토양피복형수(CN)의 결정을 위하여 강우의 발생특성, 즉 선행강우량과 토양의 공극을 및 지형인자인 각 셀마다의 유역경사에 따른 강우 유출과정의 해석을 실시하여 계산치를 산정하고 그 결과를 관측치와 비교 검토하여 호우사상에 대한 매개변수 최적치를 추정하였다. 표 1은 대상유역의 지점별 각 Cell의 평균 특성치이다. 각 소유역별로 적용한 AMC조건으로서 대상유역을 6개 소유역으로 분할하고 선정된 7개 호우사상을 이용한 분석 결과에서 CN은 선행강우량과 매우 밀접한 관계를 나타내고 있음을 알 수 있었으며, 이들 관계로부터 강우 유출해석에 이용하기 위하여 다중회귀분석을 실시한 결과, 표 2와 같이 AMC조건을 고려하지 않고 CN값을 추정할 수 있는 관계식을 유도할 수 있었다. 다음은 관계식 유도를 위한 조건식($CN = f(X_1, X_2, X_3)$)으로 X_1 은 토양의 공극율, X_2 는 각 셀의 유역경사, X_3 는 5일 선행강우량이다.

표 1 대상구역의 지점별 각 Cell의 평균 특성치

인자 \ 지점		동곡	고로	미성	병천	효령	무성	비고
CN	AMC I	71	69	71	69	66	66	-
	AMC II	79	80	82	78	77	76	-
	AMC III	85	84	85	84	81	82	-
Slope		0.0609	0.0629	0.0577	0.0450	0.0326	0.0332	-
Porosity		0.482	0.478	0.479	0.475	0.462	0.471	-

표 2 토양의 공극율, 유역경사 및 선행강우량과 CN의 관계

Dis. \ Sta.	Variables.	Regression Formula	R	T-Value	Remark
동곡	X ₃	$Y=72.272 \cdot X_3^{0.028}$	0.833	3.693	-
고로	X ₃	$Y=71.578 \cdot X_3^{0.030}$	0.766	3.948	-
	X ₃ , X ₂	$Y=43.679 \cdot X_3^{0.030} \cdot X_2^{-0.178}$	0.767	-0.188	
미성	X ₃	$Y=71.990 \cdot X_3^{0.030}$	0.767	4.996	-
	X ₃ , X ₂	$Y=37.484 \cdot X_3^{0.030} \cdot X_2^{-0.233}$	0.774	-0.704	
	X ₃ , X ₂ , X ₁	$Y=32.165 \cdot X_3^{0.030} \cdot X_2^{-0.235} \cdot X_1^{-0.201}$	0.774	-0.065	
병천	X ₃	$Y=71.631 \cdot X_3^{0.030}$	0.763	5.798	-
	X ₃ , X ₁	$Y=148.293 \cdot X_3^{0.030} \cdot X_1^{0.987}$	0.765	0.210	
	X ₃ , X ₁ , X ₂	$Y=119.193 \cdot X_3^{0.030} \cdot X_1^{0.611} \cdot X_2^{0.020}$	0.766	0.185	
효령	X ₃	$Y=67.834 \cdot X_3^{0.033}$	0.747	3.376	-
	X ₃ , X ₂	$Y=192.092 \cdot X_3^{0.029} \cdot X_2^{0.305}$	0.842	2.184	
	X ₃ , X ₂ , X ₁	$Y=76.201 \cdot X_3^{0.027} \cdot X_2^{0.441} \cdot X_1^{-1.818}$	0.856	-0.906	
무성	X ₃	$Y=70.238 \cdot X_3^{0.032}$	0.744	7.349	-
	X ₃ , X ₂	$Y=89.512 \cdot X_3^{0.031} \cdot X_2^{0.079}$	0.787	0.653	
	X ₃ , X ₂ , X ₁	$Y=147.754 \cdot X_3^{0.031} \cdot X_2^{0.043} \cdot X_1^{0.818}$	0.789	0.604	

4. 요약

분석에 이용된 격자망은 동곡, 고로, 미성, 병천, 효령 및 무성지점에 각각 12개, 30개, 45개, 76개, 46개 및 1265개의 조격자를 구성하였으며 하천의 수로방향 및 경사형태를 세분화하기 위하여 각 지점에 대하여 8개, 24개, 24개, 44개, 12개 및 64개의 세격자로 분할하였다. AGNPS를 이용한 침투유량의 모의발생 결과치가 동곡, 고로, 미성, 병천, 효령 및 무성지점에서 측정값과 비교하여 각 호우사상별로 상대오차가 1.0~25.0%, 4.0~27.0%, 7.0~29.2%, 2.0~23.9%, 3.0~25.0% 및 3.6~21.0%의 차이를 나타내었다. 분석결과에서 AMC II 조건에서는 관측치와 분석결과치가 유사하게 나타났으나 AMC I 조건에 대해서는 상대적으로 작은 값을 보였으며 AMC III 조건에서는 다소 큰 값으로 분석되었다.

SCS방법에서 제안하는 AMC조건별 CN값을 우리 실정에 적합하도록 수정 보완하기 위한 수정 유출곡선지수 CN_{mI} 과 CN_{mIII} 을 재구성하였으며, 여기에 적용되는 수정 유출

곡선지수식의 계수 a 를 추정된 결과, 기왕에 발표된 연구결과와 거의 일치된 경향을 나타내었다. 제안된 수정 CN식을 이용하여 산정한 결과치와 관측치는 거의 유사하게 나타났다. AGNPS모델에 의한 유출량 산정에 있어 수문학적 토양피복형수(CN)의 결정을 위하여 선행강우량과 토양의 공극을 및 지형인자인 각 셀마다의 유역경사를 이용하여 관계식($CN = f(X_1, X_2, X_3)$)을 유도하였으며, 분석 결과에서 CN이 선행강우량과 가장 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었으며 유역경사, 토양의 공극을 순으로 나타났다.

참 고 문 헌

- Beck, J. V., and K. J. Arnold, 1977 ; Parameter Estimation in Engineering and Science, John Wiley, Inc., New York.
- Bergstrom, S., 1978 ; Operational Hydrological Forecasting by Conceptual Models in Sweden, Hydrology och Oceanografi RH07.
- Cooper, D.M. and E.F., Wood, 1982a ; Identification of Multivariate Time Series and Multivariate Input-Out Models, Water Resources Research, 18(4), pp.937~946.
- Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson, 1987 ; AGNPS, Agricultural Non-Point Source Pollution Model : A Watershed Analysis Tool, USDA Conservation Research Report 35.
- 김진택, 1995 ; AGNPS모형을 이용한 지리자원정보시스템 호환모형의 개발 및 적용, 서울대학교 박사학위논문.
- 김종덕, 1990 ; SCS법에 의한 소유역의 홍수유출 추정, 서울대학교 석사학위논문.
- 이순탁, 지흥기, 안승섭, 1991 ; 하천유역의 홍수유출 Simulation, 대한토목학회 학술발표회 논문개요집.