

## 분산형 비점오염원 모델에서 단위유역 크기의 민감도 분석

배인희 · 박정은 · 박석순<sup>†</sup>

이화여자대학교 공과대학 환경학과

(2005년 8월 4일 접수, 2005년 9월 27일 채택)

### A Sensitivity Analysis of Cell Size on a Distributed Non-Point Source Pollution Model

In-Hee Bae · Jung-Eun Park · Seok-Soon Park<sup>†</sup>

Department of Environmental Science and Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University

**ABSTRACT** : A sensitivity analysis study was performed to examine the effects of cell size on a distributed non-point source pollution model. The model, AnnAGNPS, which is a modified version of USDA's AGNPS, was applied to Eung stream watershed, a tributary of Cheongmi stream located in the South Branch of Han River system. The model components and results, such as channel length, slope, land use, and delivery ratio, were analyzed according to the various cell sizes from 10 to 200 ha. As cell size increases, channel length decreases due to short-circuiting of meandering creek. The decreased channel length has more significant effects on the model results than any other geomorphological change. When the effects of land use and soil distribution are excluded, sediment delivery loads increase due to shorter time to reach the outlet of the watershed in larger cell size. When those effects are included, however, sediment delivery loads decrease in larger cell size because the variety of land use types can not be inputted. The predominant land use in the applied watershed is forest with very low soil erosion such that the predicted sediment delivery might be much lower than real system. The cell size of 30 ha was determined to produce the most appropriate resolution. Surface runoff and non-point source loads of TN, TP and BOD were predicted and the results agree well with the field measurements. From this study, it was shown that the model results would be very dependent on variations of topography, land use, and soil distribution, as a function of cell size, and the optimum cell size is very important for successful application of distributed non-point source pollution model.

**Key Words** : Cell Size, Sensitivity Analysis, AnnAGNPS, Distributed Model, Nonpoint Source Pollution

**요약** : 분산형 비점오염원 모델에서 단위유역 크기의 영향을 검토하기 위하여 민감도 분석 연구를 실시하였다. 미농부성의 AGNPS 모델에서 변형된 AnnAGNPS 모델을 남한강 수계의 청미천의 지류인 응천 유역에 적용하였다. 10에서 200 헥타르에 이르는 다양한 단위유역 크기에 따라 유로연장, 경사, 토지 이용, 유달율 등과 같은 모델 요소와 결과를 분석하였다. 단위유역의 크기가 증가함에 따라, 휘어진 하천이 단거리로 계산되기 때문에 유로연장이 감소하게 되고, 이것은 다른 어떤 지형 변화보다 모델 결과에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 토지 이용도와 토양 분포 효과가 제외되었을 경우, 단위유역이 클수록 유역의 최종유출구까지 도달하는 시간이 짧아져 토사 유달 부하량이 증가하였다. 그러나 이러한 영향이 포함되었을 경우, 단위유역이 클수록 적용 유역의 토지이용의 다양도가 포함될 수 없기 때문에 토사 유달 부하량이 감소하였다. 적용 유역은 토양 침식이 낮은 임야로 이루어져 단위유역이 큰 경우에는 임야 비율이 더욱 증가하여 유달 부하량이 감소하게 된 것이다. 적용 유역에서는 30 헥타르의 단위 유역이 가장 적합한 크기로 결정되었다. 강우 유출수량과 총질소, 총인, 생물화학적 산소요구량을 모델에서 예측하였으며 현장 측정치와 적절히 일치하였다. 본 연구를 통하여 모델 결과는 단위유역 크기에 따라 변하는 지형, 토지 이용, 토양분포 변이에 민감하게 변하며, 성공적인 분산형 모델적용을 위하여 최적의 단위유역 크기를 사용하는 것이 매우 중요하다는 결론을 얻었다.

**주제어** : 단위유역 크기, 민감도 분석, AnnAGNPS, 분산형 모델, 비점오염

## 1. 서 론

비점오염원이 하천수질에 미치는 영향이 증대되면서 모델을 이용하여 보다 정확하게 비점오염원 부하량을 산정하려는 노력이 이루어지고 있다. 비점오염원을 모의하는 모델에는 분석에 이용되는 공간 단위의 정밀도에 따라, 유역의 특성을 평균화하는 통합형 모델과 유역을 세분화하여 공간 다양성

을 고려하는 분산형 모델로 크게 구분할 수 있다. 최근 GIS는 지형특성, 토지이용, 토양 등과 관련된 방대한 공간자료를 보다 쉽게 추출하고 활용할 수 있는 유용한 도구로 이용되고 있으며, 이러한 GIS의 지원으로 입력자료의 방대함과 계산과정의 어려움이 해결되어 유역의 공간적 다양성을 반영할 수 있는 분산형 모델이 많이 사용되고 있다.<sup>1-3)</sup>

기존 대부분의 비점오염원 모델 연구에서는 연구자의 주관이나 입력자료의 해상도에 따라 격자의 크기를 임의로 결정하였으며, 결정된 크기에 대해 매개변수들의 최적화가 이루어졌다.<sup>2)</sup> 그러나 단위유역의 크기는 모델의 실행과 결과에

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: ssp@ewha.ac.kr  
Tel: 02-3277-3546

Fax: 02-3277-3275

중요한 영향을 미치므로 임의로 정하는 것이 아니라 단위유역 크기에 대한 민감도 분석을 통해 적정 기준 면적을 구하는 과정이 필요하다. 일반적으로 격자 크기가 작을수록 보다 세밀하게 공간적 다양성을 반영할 수 있어 모델 결과의 정확도는 높아지지만, 격자의 크기가 지나치게 작으면 입력자료를 준비하는데 소요되는 시간과 노력 뿐만 아니라 컴퓨터의 연산시간이 기하급수적으로 증가하여 효과적이지 못하다.<sup>3)</sup> 뿐만 아니라 계산시간과 공간의 필요량 증가에 비해 결과의 정확성 향상이 둔화된다. 반대로 단위유역 크기가 커지면 필요한 정보의 양은 감소하지만 유역의 특성이 평균화되어 공간의 다양성을 반영할 수 없으며, 모델 예측결과의 오류도 증가하게 된다.<sup>4)</sup> 따라서 격자크기가 모델결과에 미치는 영향을 분석하고, 공간적 다양성을 고려할 수 있으며, 효율적으로 모델을 수행할 수 있는 적정 격자크기를 선택하기 위한 연구가 이루어져 왔다. Brown et al.(1993)은 입력자료의 해상도가 ANSWERS 모델결과에 미치는 영향을 분석하였으며,<sup>5)</sup> Mamillapalli et al.(1996)과 FitzHugh and Mckay(2000)는 SWAT 모델을 통해 일반적으로 격자 크기가 작을수록 결과의 정확성이 높아진다고 하였다.<sup>6,7)</sup> 또한 Quinn et al.(1991), Zhang and Montgomery(1994), Wolock and Price(1994), Bruneau et al.(1995)도 TOPMODEL을 사용하여 위와 유사한 결론에 도달하였다.<sup>8-11)</sup>

본 연구에서 분산형 비점오염원 모델인 AnnAGNPS를 이용하여 단위유역의 크기가 모델결과에 미치는 잠재적인 영향을 알아보고, 모델이 최적의 결과를 수행하는 단위유역의 크기를 선택하여 비점오염부하량을 정량화하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 대상 지역

본 연구는 남한강의 제1지류인 청미천 유역의 소유역들 중 최종배출구에서 수질 측정이 가능한 응천 유역을 연구대상 지역으로 선정하였다. 청미천 유역은 행정구역상으로 경기도 여주군, 이천시, 안성시, 용인시와 충청북도 음성군 등 2도 3시 2군이 포함되어 있으며, 이중 응천 유역은 충청북도 음성군에 포함된다. 응천은 유로연장 20.4 km, 유역면적 104.54 km<sup>2</sup>, 평균경사도 21.84%, 평균고도는 183 m이다. 부용산 서쪽에서 발원하여 북류하면서 청미천과 합류하여 남한강으로 유입되며, 유역의 대부분이 산지(62.03%)와 농지(32.71%)로 이루어져 있다(Fig. 1).

### 2.2. 모델 개요

본 연구에 사용된 AnnAGNPS(Annualized Agricultural Non-Point Source) 모델은 1987년 미국 농무성(USDA)에서 개발한 AGNPS 모델에 기초를 두고 있다. AnnAGNPS는 단일 강우사상만 모의할 수 있었던 AGNPS의 단점을 보완하여, 연속 강우 사상에 의해 농업유역으로부터 발생하는 유출, 토양유실 및 오염물질의 양을 추정하기 위해 개발된 분산형

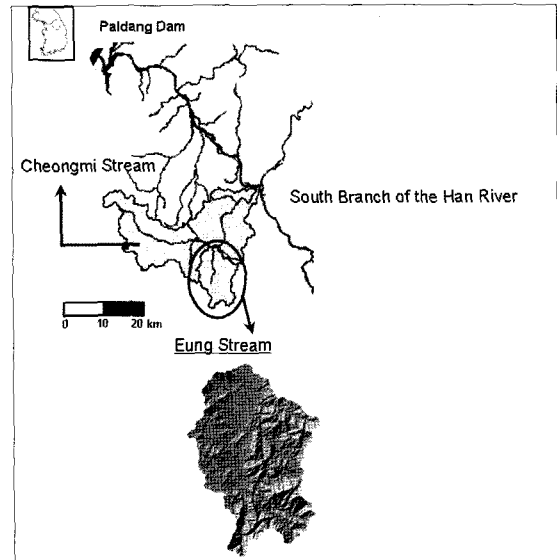


Fig. 1. Location of the study area with digital elevation model.

비점오염원 모델이다.<sup>12)</sup> 또한 GIS와 연계 가능하여 모형의 입력자료 구축이 비교적 용이하고, 유역의 특성을 고려하여 단위유역내 토지이용이 균일하도록 세분할 수 있다.

### 2.3. 모델 적용

단위유역(Cell 또는 Subbasin) 크기가 비점오염원 모델 결과에 미치는 영향을 알아보기 위해, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200 ha로 단위유역 크기를 변화시키면서 유역을 구획하고 각 단위유역별 인자를 계산하였다. AnnAGNPS 모델은 정방형 격자를 구성하는 AGNPS 모델과는 달리 단위유역의 형태가 부정형이므로 단위유역 모양이 정사각형이라 가정하고, 하천의 상류에 위치한 단위유역 면적인 CSA(Critical Source Area, 주하천이 시작되는 상류 배수구역의 최소면적)를 단위유역의 크기로, 양쪽 단위유역에 접하는 하천길이를 MSCL(Minimum Source Channel Length, 주하천의 최소길이)로 간주하였다(Table 1). 단위유역의 크기에 따라 대상지역을 구획한 그림은 Fig. 2에 제시하였다.

응천 유역의 지형 특성은 환경부에서 제공하는 1초 간격의 DEM(Digital Elevation Model)을 이용하여 유역의 최종

Table 1. Topological changes for various cell sizes

Cell Size (ha)	No. of Cells	No. of Reaches	MSCL (m)	Channel Length (m)	Cell Slope (%)	Reach Slope (%)
10	769	320	316	194,185	19.0	3.83
20	421	174	447	140,913	18.7	2.71
30	265	108	548	112,046	19.0	2.02
40	163	66	632	93,474	20.0	1.98
50	148	60	707	86,821	19.4	1.61
60	138	56	775	81,538	20.0	1.58
100	63	26	1,000	60,361	20.9	1.24
200	43	18	1,410	48,792	20.8	0.93

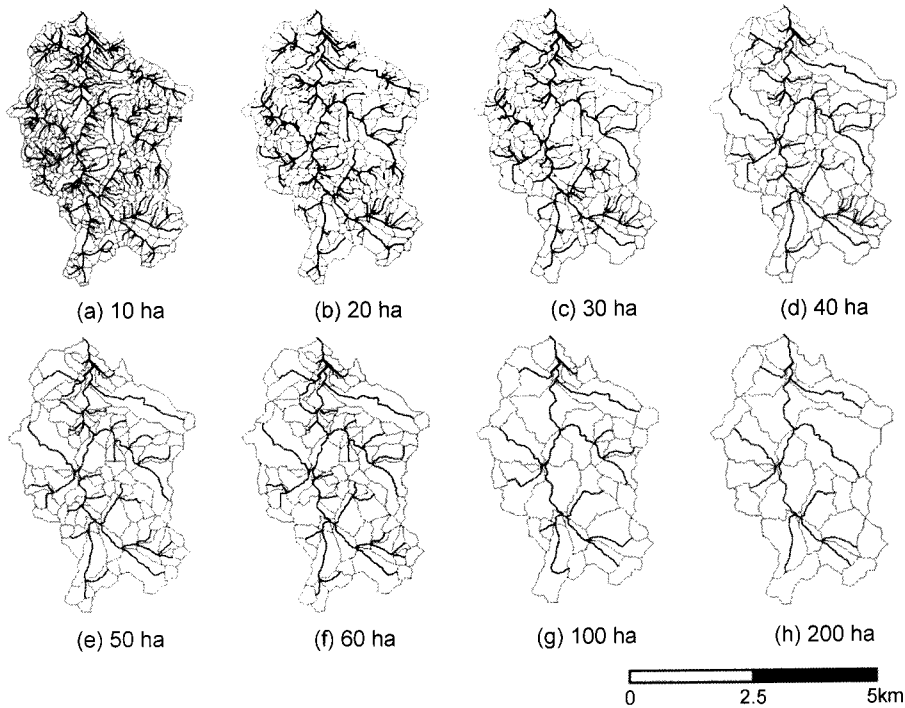


Fig. 2. Watershed delineations of Eung stream watershed for various cell sizes.

배출구, 단위유역의 크기, 각 단위유역의 면적, 평균 고도, 유역경사도, 하천경사도, 길이 등을 분석하였다. 환경부의 대분류 토지피복분류도(축척 1 : 50,000)와 농업과학기술원의 정밀토양도(축척 1 : 25,000)를 유역 경계와 중첩시켜 응천 유역의 단위유역별 토지이용과 토양특성을 분석하였으며, 인근지역에 위치한 장호원과 노은 자동기상관측소의 2002년 일별 기상자료를 모델에 적용하였다. 연간 비료사용량 및 농작물 생산량은 통계자료를 참고하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 단위유역 크기에 따른 지형변화

단위유역 크기에 따른 지형적 특성을 Table 1에, 10 ha일 때의 결과를 기준으로 계산한 상대적 변화량을 Fig. 3에 제시하였다. 단위유역의 크기가 커질수록 유역을 구획하는 단위유역과 유하구간(Reach, 단위유역의 하천구간)의 수가 감소한다. 하천은 굴곡이 완만해져 직선화되며, 작은 지류들이 하천망에서 제외되면서 유로연장(Channel Length, 전체유역의 총 하천길이)이 짧아진다. 그러나 지형도(축척 1 : 50,000)에서 측정된 유로연장과 비교하였을 때, 단위유역의 크기가 30 ha와 40 ha일 때 오차가 각각 10%, 8%로 실제 유로연장을 가장 근접하게 모의하였다. 또한 단위유역의 크기가 커질수록 단위유역의 평균경사도는 별다른 경향을 나타내지 않았는데, 이는 응천 유역의 대부분이 산지이며 비교적 고른 분포를 보이기 때문이다. 반면 각 단위유역별 고도차에 비해 상대적으로 MSCL이 길어지므로, 단위유역이 커질수록 유하구간의 평균경사도는 감소하는 것이라고 사료된다.

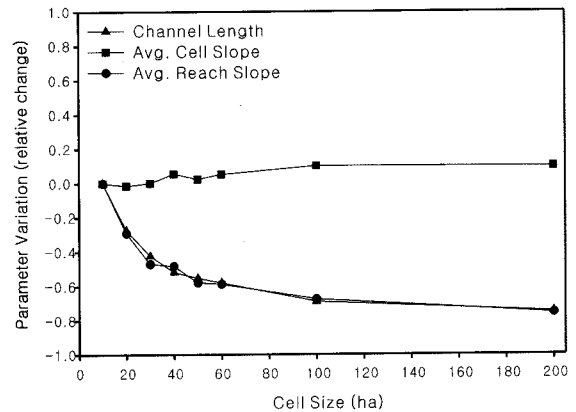


Fig. 3. Relative changes of topography for various cell sizes.

#### 3.2. 공간적 다양성에 따른 모델결과

토지이용 및 토양의 공간적 다양성이 모델결과에 미치는 영향을 배제하고, 단위유역 크기에 따른 변화가 토사 유출량에 미치는 영향을 분석하였다. 모든 단위유역에 동일한 토지이용과 토양자료를 입력하고 토사의 배출부하량과 유달부하량의 상대적인 변화량을 분석하였다(Fig. 5-a). 배출부하량이란 단위유역에서 발생된 부하량이 공공수역으로 직접 또는 처리후 배출되는 오염물질의 양을 말한다. 따라서 단위유역이 클수록 단위유역내 흐름경로(Flow Path)가 길어져 토사 침전량이 증가함으로써 배출부하량이 감소하는 것으로 판단된다. 토사의 유달부하량은 배출부하량이 자정작용과 같은 물질변화과정을 거친후 유역의 수계구간 하단 지점에 도달되는 양이다. 그러므로 단위유역이 클수록 유로연장이 감소하여 각 단위유역의 배출부하량이 하천을 따라 응천 유역의 하단

지점까지 도달하는데 걸리는 시간이 짧아지며, 이로 인해 상대적으로 토사침전량이 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 변화에 따라 단위유역이 커질수록 유달률은 증가하는 경향을 보이며, 이는 하천의 토사운송 효율이 증가함을 뜻한다. 일반적으로 토사운송량은 하천경사도에 비례하며 앞 절에서 단위유역 크기가 유하구간의 평균경사도에 영향을 미치는 것으로 나타났으므로 하천경사도가 토사운송 효율, 즉 유달률에 영향을 미칠 것으로 예상하였으나 위에서 언급한 바와 같이 분석결과 그렇지 않은 것으로 나타났다. 이는 단위유역 크기가 커질수록 단위유역당 흐름경로도 함께 증가하므로 하천경사도가 토사운송량에 미치는 영향을 상쇄하기 때문이라 사료된다.

한편, 단위유역 크기에 따른 지형적 변화뿐만 아니라 토지 이용과 토양의 공간적 다양성이 토사 유출량에 미치는 영향을 살펴보았다. 우선 각 단위유역에서 가장 많은 면적을 차지하는 토지이용과 토양특성을 모델에 입력하기 때문에 단위유역 크기가 커질수록 공간적 다양성을 반영할 수 없으며 (Table 2와 Fig. 4), 단위유역 크기에 따라 토양 침식성 인자(K)의 분포도 차이가 있음을 알 수 있다(Table 3). 지형의 변화만을 고려했을 경우, 단위유역이 커질수록 하천길이도 감소하여 응천 유역의 최종 유출구에 도달하는 토사의 유달 부하량은 증가하였으나, 토지이용 및 토양의 공간적 다양성을 고려하면 단위유역내 흐름경로가 길어지고 강우시 토사 유실량이 적은 산지의 비율이 증가하며, 토양침식성인자값이 작은 토양의 비율이 증가한다. 따라서 Fig. 5(b)에 제시된 바와 같이 지형적 변화만을 고려했을 때보다 토사 배출부하량은 크게 감소된다. 이 감소량은 유로연장 변화로 인한 토사침

전량 감소보다 크기 때문에 토사의 유달부하량은 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 유달률은 각 유역의 배출부하량으로부터 최종 유출구까지 도달하는 동안 침전되는 양만을 고려하므로 단위유역이 커질수록 증가하는 경향을 보였다.

Table 2. Land use and soil distribution for various cell sizes

Cell Size (ha)	Land Use (%)						No. of Soil Series
	Forest	Cropland	Pasture	Dry Field	Water	Urban	
Real Value	63.31	31.47	1.74	0.91	1.09	1.01	48
10	68.40	30.22	0.22	0.00	0.57	0.59	38
20	69.73	29.42	0.00	0.00	0.38	0.46	35
30	74.81	24.62	0.00	0.00	0.54	0.00	28
40	73.50	26.50	0.00	0.00	0.00	0.00	21
50	73.20	26.80	0.00	0.00	0.00	0.00	20
60	72.36	27.64	0.00	0.00	0.00	0.00	23
100	72.10	27.90	0.00	0.00	0.00	0.00	14
200	74.21	25.79	0.00	0.00	0.00	0.00	10

Table 3. Soil erosion factor(K) distribution for various cell sizes

Soil Erosion Factor	Cell Size (ha)							
	10	20	30	40	50	60	100	200
$K \leq 0.1$	49.85	50.38	52.41	54.13	56.41	56.39	55.40	64.24
$0.1 < K \leq 0.2$	20.60	19.97	20.86	19.59	19.21	20.54	18.18	14.65
$0.2 < K \leq 0.3$	25.71	25.81	21.58	23.74	21.56	20.29	22.71	18.32
$0.3 < K \leq 0.4$	1.17	2.09	3.12	0.77	0.94	0.85	2.79	2.79
$0.4 < K$	1.57	1.34	1.03	0.94	1.02	1.02	0.92	0.00

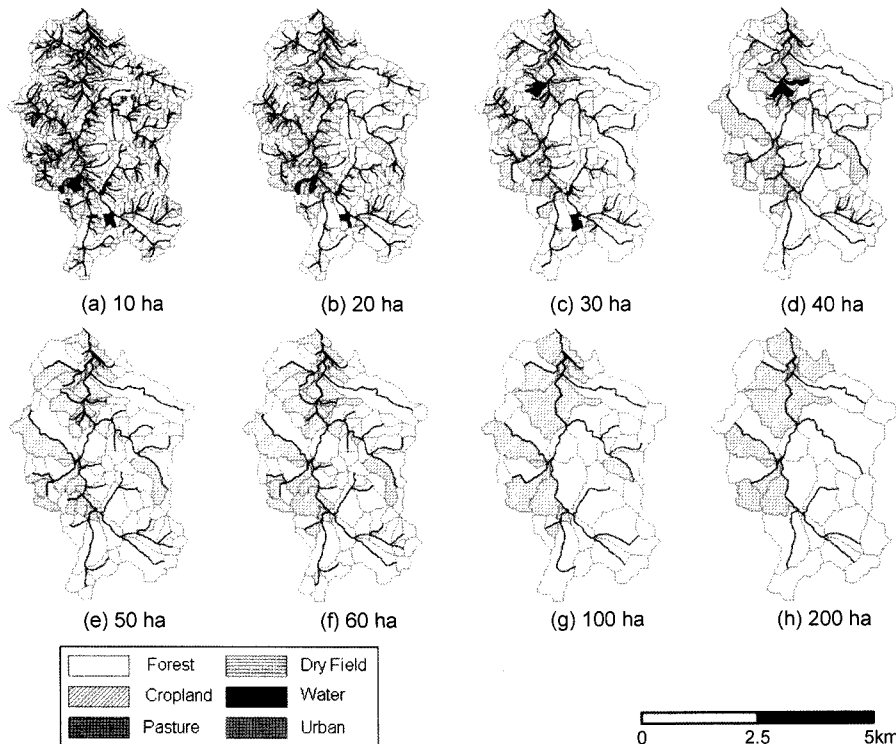


Fig. 4. Spatial distribution of landuse in Eung stream watershed for various cell sizes.

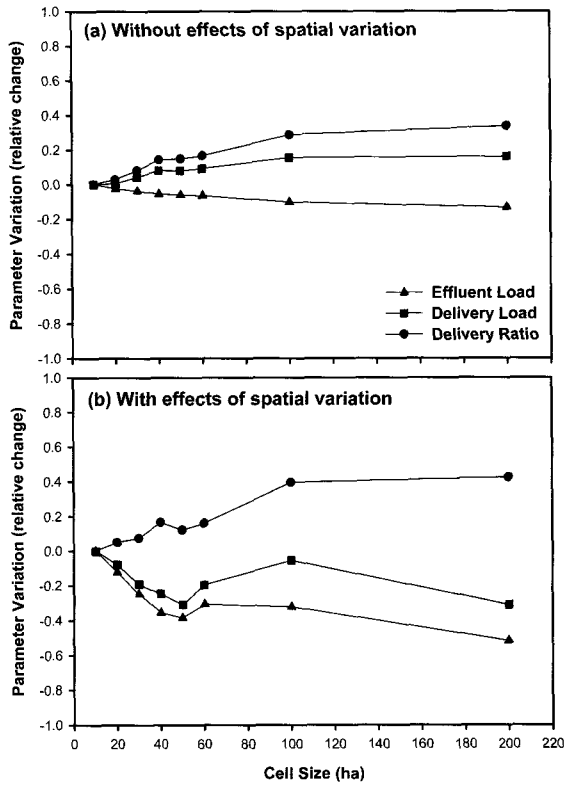


Fig. 5. Relative changes of effluent load, delivery load and delivery ratio of sediment for various cell sizes due to spatial variation.

3.3. 적정 단위유역 크기의 모델 결과

Feezor et al.(1989)은 AGNPS모형을 적용하여 격자크기가 작을수록 모델결과의 정확도가 높아지고 격자크기가 클수록 침식량을 적게 예측하기 때문에 가장 작은 격자크기가 최적의 크기라고 하였다.<sup>13)</sup> 그러나 앞에서 살펴본 바와 같이 단위유역의 크기가 크면 유로연장이 짧아지며, 단위유역의 크기가 작으면 공간다양성 반영정도가 큰 반면에 실제 존재하지 않는 작은 지류들까지 생성하므로 유로연장이 실제보다 과대평가되며 비점오염원 부하량 산정결과에 부정적인 영향을 미칠 수 있을 뿐만 아니라 물리적 원리에 근거하지 않는 인위적인 결과가 발생할 수 있으므로 가장 작은 단위유역 크기가 반드시 최적의 크기가 되는 것은 아니다.<sup>14)</sup>

따라서 본 연구에서는 응천 유역의 실제 하천망과 토지이용 및 토양의 공간적 다양성을 유사하게 반영하는 30 ha 크기를 선택하여 응천 유역의 비점오염원 부하량을 산정하였으며 이를 최소 단위유역 크기인 10 ha일 때의 결과와 비교하였다. AnnAGNPS 모델은 강우시 연속측정한 수질자료를 이용하여 계수가 보정된 모델을 사용하여 2002년 1월부터 12월까지의 하천유량, TN, TP, BOD 비점오염원 부하량을 예측하였다. 청미관측소에서 실측하는 유량을 유역 면적비를 이용하여 월평균유량을 산정하였고 TN, TP, BOD 관측 부하량은 앞에서 계산된 유량과 최종유출구 지점에 위치한 청천교에서 측정된 수질자료를 이용하여 응천유역의 월평균 유량 부하량을 산정하였다.

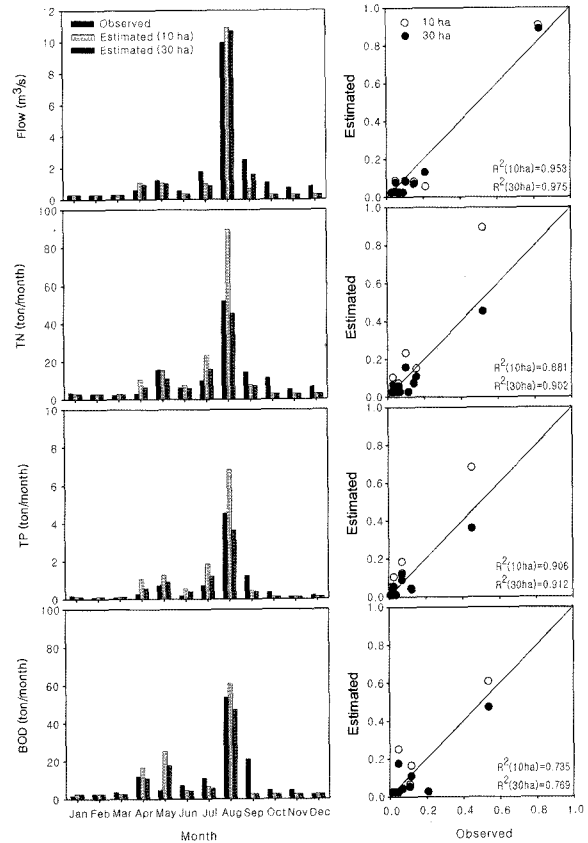


Fig. 6. Comparison with AnnAGNPS model results at 10, 30 ha cell size and observed values.

응천의 기저유량을 고려하여 월별 평균 하천유량을 산정하였으며, TN, TP, BOD 부하량은 전기인 1~3월의 값을 평균하여 기저값으로 사용하였다. 10 ha와 30 ha일 때의 응천유역의 유량, TN, TP, BOD 부하량 모델 예측값, 실측값 및 결정계수를 Fig. 6에 제시하였다. 10 ha일 경우보다 30 ha일 때 모든 항목이 유역의 특성을 반영하여 실측값을 잘 모의하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

공간적 다양성을 반영하기 위하여 분산형 모델을 많이 사용하고 있지만, 모델을 대상유역에 적용하기 전에 단위유역 크기의 영향을 분석하고 적절한 단위유역 크기를 결정하는 연구가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 청미천의 지류인 응천 유역을 대상으로 분산형 모델을 적용하였을 때 단위유역의 크기가 모델결과에 미치는 영향을 알아보았다. 분산형 모델로는 연속강우사상을 모의할 수 있는 AnnAGNPS를 이용하였으며 단위유역 크기를 10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200 ha로 구획하였다. 단위유역 크기가 30 ha와 40 ha일 때 실제 유로연장에 가장 근접한 결과를 보였으며 이때 오차는 각각 10%와 8%였다. 단위유역 크기가 커질수록 하천골짜기 완만해지고 작은 1차 지류들이 제외되므로 유로연장은 급격하게 짧아졌으며 하천망 또한 단순해짐을 알 수 있다. 유로연장

이 짧아지면 최종유출구까지 도달하는 시간도 짧아지므로 토사침전량이 감소하게 되어 유달부하량과 유달률에도 영향을 미쳤다. 단위유역 크기에 따른 지형적 특성의 변화를 살펴본 결과, 유로연장의 변화가 다른 지형적 특성의 변화보다 모델결과에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 한편, 단위유역 크기별로 토지이용 및 토양의 공간적 다양성을 고려한 결과, 단위유역이 커질수록 토지이용과 토양의 다양성을 반영하지 못하여 토양침식에 큰 영향을 받지 않는 산지와 토양 침식성인자의 값이 작은 토양의 비율이 증가하였다. 이에 따라 유로연장 변화만을 고려했을 때보다 배출부하량이 감소하는 폭이 커지는 것을 알 수 있었으며, 유달부하량은 유로연장만을 고려했을 때와는 반대로 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만 하천의 운송 효율을 의미하는 유달률은 지형적 변화만을 고려했을 때와 거의 변함이 없어 주로 유로연장에 의해서 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

이와 같이, 토사 유출량은 단위유역 크기에 따른 지형적 특성의 변화와 공간적 다양성 반영정도에 따라 크게 달라졌다. 단위유역 크기가 작을수록 실제 유역의 공간적 다양성과 유사하게 모델에 반영할 수 있지만 하천망을 너무 자세하게 묘사하여 유로연장이 실제보다 길어져 모델 결과에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 따라서 단위유역 크기에 따른 지형변화와 토지이용 및 토양의 공간적 다양성 반영정도에 따른 상호작용에 의해 모델 결과가 달라지므로 단위유역 크기가 작아야만 최적의 결과를 도출하는 것은 아니라고 사료된다. 웅천 유역의 비점오염원 부하량 산정을 위하여 실제 유역의 토지이용 및 토양의 공간적 다양성 반영정도와 실제 유로연장의 근사치를 고려하여 30 ha의 단위유역 크기를 선택하여 유량, TN, TP, BOD 부하량을 모의하였다. 모델 적용 결과, 실측값을 잘 모의하는 결과를 보였다.

분산형 모델을 이용하기 위하여 유역을 세분화할 때 단위유역의 크기가 모델 결과에 상당한 영향을 미치는 요인으로 작용하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 입력자료의 해상도를 사용하거나 임의로 단위유역 크기를 결정하는 것이 아니라 반드시 모델 적용에 앞서, 단위유역 크기에 따른 모델 결과를 분석하고 유역의 공간적 다양성과 지형적 특성을 반영할 수 있는 크기의 단위유역을 선택해야 한다. 특히 정량적인 비점오염원 부하량 산정에 기초한 하천의 수질 향상을 위한 효율적인 유역 관리를 위하여 분산형 비점오염원 모델을 적용할 때에는, 유역의 공간적 다양성을 반영할 수 있는 스케일의 단위유역을 결정하는 전처리 과정을 거쳐야 할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

1. León, L. F., Soulis, E. D., Kowen, N., and Farquhar, G. J., "Nonpoint source pollution: a distributed water quality modeling approach," *Water Res.*, **35**(4), 997~1007(2001).
2. 유금환, 오경미, 박희경, "확률론적 방법을 이용한 분포형 비점오염원 모델의 격자크기에 따른 매개변수 민감도 분석," 대한환경공학회 '99추계학술연구발표회 논문집(I), 대한환경공학회, 광주, 363~364(1999).
3. 양인태, 김연준, "수문해석을 위한 DEM에 의한 지형의 경사도분석에서 격자크기의 영향," 한국측지학회지, **15**(2), 221~230(1997).
4. Vieux, B. E., "DEM aggregation and smoothing effects on surface runoff modeling," *Journal of Computing in Civil Engineering*, **7**(3), 310~338(1993).
5. Brown, D. G., Bian, L., and Walsh, S. J., "Response of a distributed watershed erosion model to variations in input data aggregation levels," *Computers and Geosciences*, **19**(4), 499~509(1993).
6. Mamillapalli, S., Srinivasan, R., Arnold, J. G., and Engel, B. A., "Effect of spatial variability on basin scale modeling," in Proceedings of Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico(1996).
7. FitzHugh, T. W. and Mackay, D. S., "Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint pollution model," *Journal of Hydrology*, **236**, 35~53(2000).
8. Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., and Planchon, O., "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models," *Hydrological Processes*, **5**, 59~79(1991).
9. Wolock, D. M. and Price, C. V., "Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model," *Water Resources Research*, **30**(11), 3041~3052(1994).
10. Zhang, W. and Montgomery, D. R., "Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations," *Water Resources Research*, **30**(4), 1019~1028(1994).
11. Bruneau, P., Gascuel-Oudou, C., Robin, P., Merot, Ph., and Beven, K., "Sensitivity to space and time resolution of a hydrological model using digital elevation data," *Hydrological Processes*, **9**, 69~81(1995).
12. Bingner, R. L. and Theurer, F. D., AnnAGNPS Version 2: User Documentation, USDA-NRCS(2000).
13. Feezor, D. R., Hirschi, M. C., and Lesikar, B. J., "Effect of cell size on AGNPS prediction," ASAE Paper No. 89-2662, American Society of Agricultural Engineers(ASAE), Chicago, III(1989).
14. Vieux, B. E. and Needham, S., "Nonpoint-pollution model sensitivity to grid-cell size," *Journal of Water Resources Planning and Management*, **119**(2), 141~157(1993).