

**준 분포형 모형을 이용한 비점오염원 유출모델링 및 관리
-삼척 오십천을 중심으로-**
강상혁*

**Non-point Source Pollutants Runoff Modeling and its Management
Using Quasi Distributed DEM
-Focused on the Oshipchon of Samcheok**
Sang-Hyeok Kang*

요 약

본 연구에서는 폐쇄성 수역에 있어서 비점 오염원의 모델링 및 적정 수환경 관리방안에 대하여 고찰하였다. 공간적으로 분포하는 각종 환경정보를 효과적으로 얻기 위하여 GIS데이터(contour data)를 이용하였다. 등고선 데이터로부터 소유역 및 하도망을 자동적으로 도출하였으며, 준 수치고도모델(Quasi Digital Elevation Model)을 모형화함으로써 유역으로부터의 질소 오염물질 유출량을 해석하였다. 본 모형은 실측자료를 토대로 유효화하였다. GIS와 연계한 본 모형은 수역의 오염현황을 고려한 유역의 비점 오염원 유출 분석에 효과적이며, 향후 수 환경 관리에 적절하게 이용될 것으로 기대한다.

주요어 : 준 분포형 모형, 비점오염원 모델링 및 관리

ABSTRACT : This paper presents the modeling of non-point source pollutants runoff and its desirable water environmental management to closed waterbody. To obtain spatially distributed environmental information, we have used contour data to extract stream channels automatically and to divide networks of watershed. A Quasi Digital Elevation Model (DEM) has been developed, validated, and adopted to estimate the runoff of total nitrogen pollutant from watershed. The GIS-linked model can be applied effectively to the non-point source pollutants from watersheds considering water conditions in receiving waters. It will be useful to manage water environment in receiving waters.

Key words : Quasi-DEM, Non-point pollutant modeling and its management

*삼척대학교 환경공학과 겸임교수(kang7231@hanmail.net)

1. 서 론

수역에 있어서 우리나라의 수질관리는 주로 하수보급율의 증가, 공장폐수의 배출 수 수질 기준 강화 등 점오염원을 중심으로 관리되어 왔다. US EPA의 보고에 의하면 수역에서 발생하는 전체오염원 중에서 비점오염원이 차지하는 비율은 개략 30%로 보고 있으며 이는 유역의 토지이용 형태에 따라 그 기여율이 달라진다고 지적하고 있다(Wu J.S., et al., 1998). 그러나 우리나라의 경우 일년에 내리는 총강수량의 약 70%가 6-9월에 집중하고 지형적으로 전국토의 70%가 산지로 구성되어 있으므로 비점 오염원은 강우에 따른 홍수와 함께 관리하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

더욱이 최근 도시화의 급속한 진행에 따라 전체 오염 유출량에 대한 비점원 오염 유출량이 접하는 비율이 증가하는 경향으로 볼 때 수역의 수질을 적절히 관리하기 위해서는 유역 내에 분포하는 비점원 오염 발생량의 공간적·시간적인 분포를 파악함과 아울러 수역으로 유출되는 오염 발생량을 양적·질적인 측면에서 규명하는 것이 중요시되고 있다. 이와 같은 목적을 달성하기 위해서는 유역에 분포하는 오염원뿐만 아니라 및 수역에서의 수환경을 정확하게 평가하여 장래 환경변화를 적절하게 예측할 수 있는 유역관리 모델을 구축할 필요가 있다. 유역의 유출현상에 대해서는 지리·지형정보의 정비에 의해 이들 지형정보를 이용한 분포형 유출해석이 다수 진행되고 있다(Lu, M., 1989; Noguch, M et al., 2000, 2001). 지형정

보를 이용한 수치고도모형의 이용은 1984년 O'Callaghan과 Mark에 의해 제안된 이후 여러 유역에 있어서 적용 및 검토가 이루어져 왔으나(Qiang L. et al. 1999, Fujita A. et al. 2001 and AO, T. et al. 2001) 대부분 유역의 유출에 국한되고 있으며 수역의 수질현상을 고려한 비점 오염원의 평가는 진행되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 GIS를 이용한 준 분포형 수치 모형을 이용하여 유역으로부터 수역으로 유입하는 유량 및 오염 유출량을 정확히 예측함과 아울러 수량과 수질을 동시에 관리하는 방안을 제시하고자 하였다.

2. 유역현황

삼척 오십천 유역은 동경 128° 59' 30" ~ 129° 07' 54", 북위 37° 09' 14" ~ 37° 20' 14" 사이에 위치하고 있으며, 유역의 동측으로는 강원도 삼척시 근덕면, 노곡면이 서측으로는 태백시 하장면, 남측으로는 시가지와 경계를 이루고 있다.

본 연구에서 적용유역은 삼척 오십천의 상류인 도계유역이며 유역면적은 삼척 오십천 전체 유역면적 394.72km²의 40.7% 해당하는 136.80km²이고 유로연장은 23.2km이다. 하천의 형상은 대체적으로 수지상이라 할 수 있으며 유로가 산지부를 통과할 때는 대체로 사행이 심하고 하상경사가 급하여 유속이 빠른 편이다.

또한 삼척 오십천은 해발 1,000m 이상의 태백산맥에서 발원 동해안으로 유입되는 하천으로 유역전체가 험준하고 경사가 급한 편이다.

한편 유역의 상류에는 도계읍이, 하류에는 삼척시가 각각의 하천과 접하여 형성되어 있고 그 밖에 하천의 좌, 우측에는 농경지 및 촌락이 형성되어 있으며 대부분이 산간지로 되어 있다. 하천 하류부에는 삼척시가지가 형성되어 있으며 하천변은 넓은 둔치가 조성되어 지역 주민의 낚시, 레크리에이션 등 여가 활동 공간으로 이용되고 있어 쾌적한 수환경의 유지가 요구되고 있다.

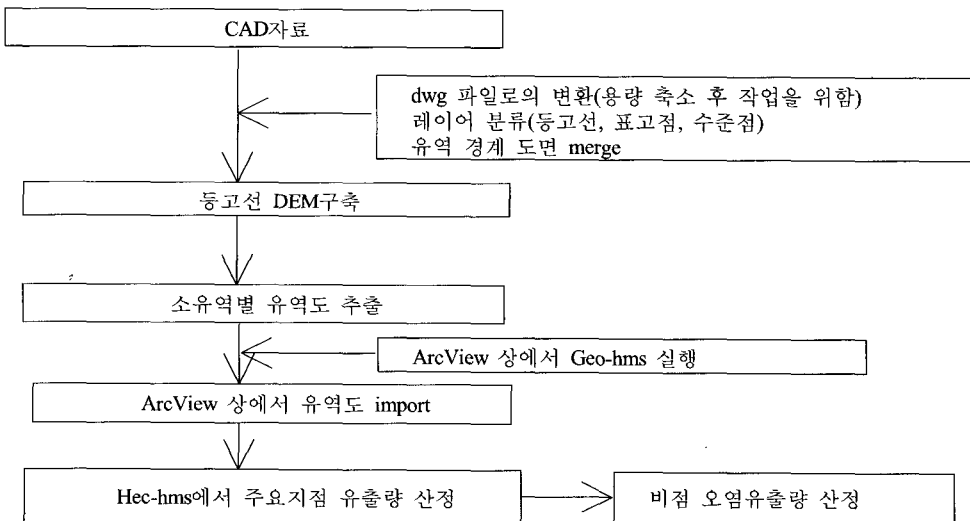
3. 연구방법

본 연구에서는 삼척 오십천 유역의 상류 지역인 도계 지역을 대상으로 준 분포형 모형을 적용하여 강우 유출에 따른 비점오염원의 유출에 대하여 분석하고자 하였다. 특히 도계 지역은 유역 지형의 형태학적 측면에서 보면 하천의 유로연장이 짧고 하상 경사가 크며 만곡이 발달한 전형적인

산지 계곡형 하천 형상을 보이고 있다. 도계 지역의 상류지역은 대부분 산림으로 형성되어 경작지가 많은 평지 하천 유역과 대비되는 지형적 특성을 가지고 있다.

유역 특성인자 및 유출 분석 모형은 ArcView상에서 Geo-hms와 Hec-hms를 연계하여 홍수 유출량을 산정하였다. Geo-hms는 사용자 하여금 공간 정보를 시각화하고 유역분수계의 여러 특성들을 종합하여 공간분석을 수행하며 소유역과 하천을 묘사하고 수문 모형으로의 입력 자료를 구축하는데 널리 사용되고 있다.

그리고 Hec-hms는 강우-유출 분석 모형으로서 1964년 설립된 미육군공병단(U.S Army Corp of Engineering Distriction) 수문 연구센터인 HEC(Hydrologic Engineering Center)에서 개발된 소프트웨어로서 수자원 해석 모델로 현재 국내에서 뿐만 아니라 국외 에서도 범용 적으로 널리 사용되어지고 있는 수문 프로그램이다.



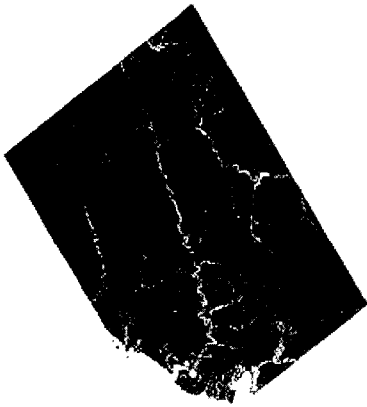
[그림 1] 비점 오염원 모델링 과정

4. 유출 모형의 구축

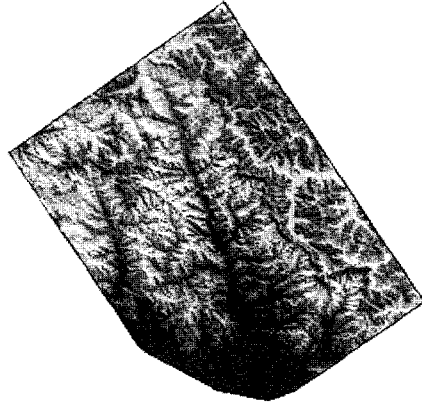
4.1 유역정보 추출

수치 지도를 이용하여 강우에 따른 유출 과정을 모의하기 위해서는 복잡한 전처리 과정을 유역의 물리적인 유출 영향 인자를 산정할 필요가 있다. 일반적으로 정도가 높은 수문해석을 위해서는 표고 데이터를 직접 이용하여 DEM유출모형을

적용하는 것이 편리하지만 본 유역은 현재 1/25,000 CAD 수치지도를 제공하고 있으므로 이로부터 등고선, 표고점, 수준점 등 유출에 관한 레이어를 추출하여 유출 DEM을 구축하였다. 전처리의 주요 과정을 살펴보면, [그림 2]는 대상 유역인 삼척 오십천 유역에 대하여 수치지도(CAD)로부터 등고선 레이어를 추출한 것이며 [그림 3]은 불규칙 삼각망(TIN)을 나타내고 있다. [그림 4]는 filling 과정, flow direction 과정, flow accumulation 과정 등을



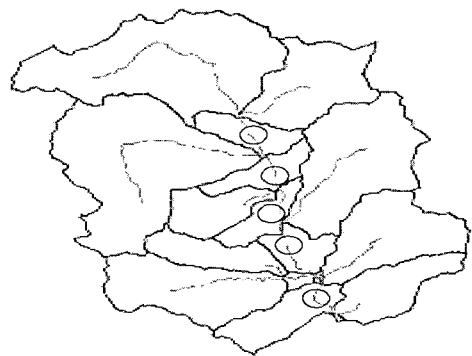
[그림 2] 등고선 레이어 추출



[그림 3] TIN 형성



[그림 4] 소 유역별 유역도 추출



[그림 5] 대상 유역의 추출 및 잔류유역(O 마크)

통하여 형성된 소유역별 폴리곤을 나타내며 [그림 5]는 본 연구의 대상 유역인 삼척 오십천의 도계 유역을 나타내고 있다. 등고선으로 DEM을 구축하는 경우 [그림 5]와 같이 어느 소유역으로도 포함되는 않는 잔류유역(residual basin)이 발생하게 되는데 잔류유역을 고려하지 않는 경우 전체 유역이 과소평가 되므로 유출량에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구의 경우 잔류유역은 구배가 낮은 소유역으로 편입시켜 유출량이 합산되도록 하였다.

4.2 강우 유출 모형의 구축

Basin model은 GUI(graphic user interface)를 이용하여 자료의 입출력이 가능하다. GUI를 통하여 수문요소를 나타내는 Basin model 구성, 자료편집, Basin model의 관리, 모의 결과 검토 등의 작업을 할 수 있다.

배경지도는 Basin model의 공간적인 특성을 표현할 목적으로 만들어지며 유역의 모식도와 같은 역할을 한다. Basin model에서 구성되는 수문요소들은 소유역(sub-basin), 하도구간(river reach), 합류점(junction), 저수지(reservoir), 분류점(diversion), 수원점(source) 및 함몰점(sink) 등을 포함하고 있다. Basin model을 구성하기 위해서는 위와 같은 수문요소들을 정의하고 이들의 반응을 모의하기 위한 자료가 입력되어야 한다. 소유역은 유역 출구로 홍수량을 유출시키는 요소이고 하도구간은 상

류의 유입수문곡선을 받아서 하류로 유출수문곡선을 내보내는 선형 함수와 같은 요소이며 합류점은 두개 이상의 유입수문곡선이 합쳐져서 하나의 유출수문곡선을 만들어지는 위치이다. 소유역의 분할정도는 유역의 물리적 매개변수와 함께 유출량에 직접적인 영향을 미치는 지형인자(김성준, 2002; 김성준, 2002; M. Ru, 1989)이나 표고 DEM과는 달리 본 등고선 모형인 경우 소유역 추출의 한계가 있으므로 제1지류까지 세분하였다.

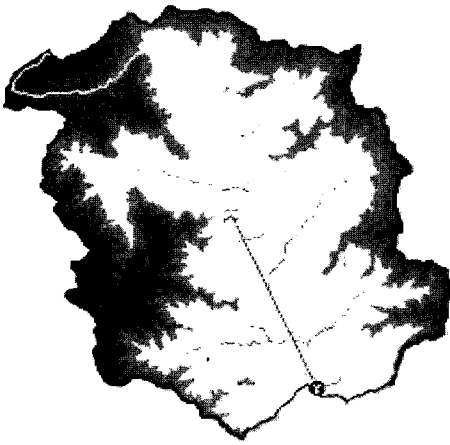
유출량의 산정에는 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 현재 실무분야에서 일반적으로 적용하고 있는 단위도법인 Clark 유역 추적법을 사용하였다. [그림 6]은 ArcView상에서 Geo-hms모듈을 사용하여 import한 것이며 [그림 7]은 잔류유역은 merge하여 Hec-hms에서 계산을 수행하기 위한 네트워크화 한 것을 나타낸다.

따라서 전체적인 네트워크의 유출성분은 다음 Kinematic Wave의 가상유로상의 운동방정식을 만족하도록 하였다.

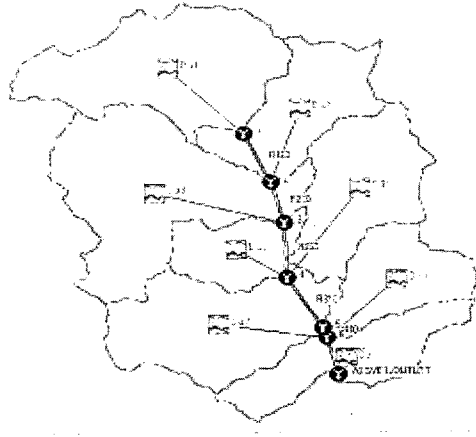
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

여기서 Q는 흐름 방향 x에 대해 시간 t 변화에 따른 유량이며 A는 통수면적을 나타내며 유역 내 유량은 보존되므로 (1) 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dQ}{dt} = 0 \quad (2)$$



[그림 6] ArcView 상에서 완성된 대상유역 모식도



[그림 7] Hec-hms로 import한 대상유역 모식도

<표 1> 적용지역 내 소유역별 유로연장, 면적 및 하상경사 추출결과

Shape	Area	Perim	Area	Perim	Area	Perim	Area	Perim	Area	Perim	Area	Perim	Area	Perim	Area	Perim	Area	Perim
Polyline	1	5	1	2	8	3372	3371.5	0.052	7221246	3600000	P80							
Polyline	2	5	2	3	8	3118	3118	0.0429	3954023	3600000	P80							
Polyline	3	12	2	4	8	2076	2076.4	0.0145	3600000	2300000	P120							
Polyline	4	2	4	5	8	1822	1821.2	0.0125	2300000	2000000	P210							
Polyline	5	15	6	4	8	3032	3032.2	0.0512	6400000	2300000	P160							
Polyline	6	25	7	5	8	1516	1516.2	0.0339	3600000	2000000	P280							
Polyline	7	25	5	6	8	3300	3300.3	0.0443	2000000	1900000	P290							
Polyline	8	15	9	8	8	3308	3308.2	0.0221	3614765	1900000	P190							
Polyline	9	3	6	10	8	2406	2406.4	0.0155	1500000	1502380	P310							
Polyline	10	30	11	12	8	1013	1012.7	0.0724	2572052	1633522	P170							
Polyline	11	4	12	10	8	1235	1234.5	0.0372	1633522	1502380	P400							
Polyline	12	4	10	13	8	416	416.4	0.0005	1502380	1500000	P410							
Polyline	13	25	14	13	8	3551	3551.4	0.0234	3653275	1500000	P130							
Polyline	14	42	15	12	8	4663	4663	0.0235	4500000	1833522	P420							
Polyline	15	52	16	17	8	56	17.7	-0.0538	1412089	1427594	P500							
Polyline	16	45	12	16	8	1749	1749.5	0.0250	1500000	1412089	P490							
Polyline	17	52	16	16	8	1112	1112.1	0.0229	2000000	1412089	P520							

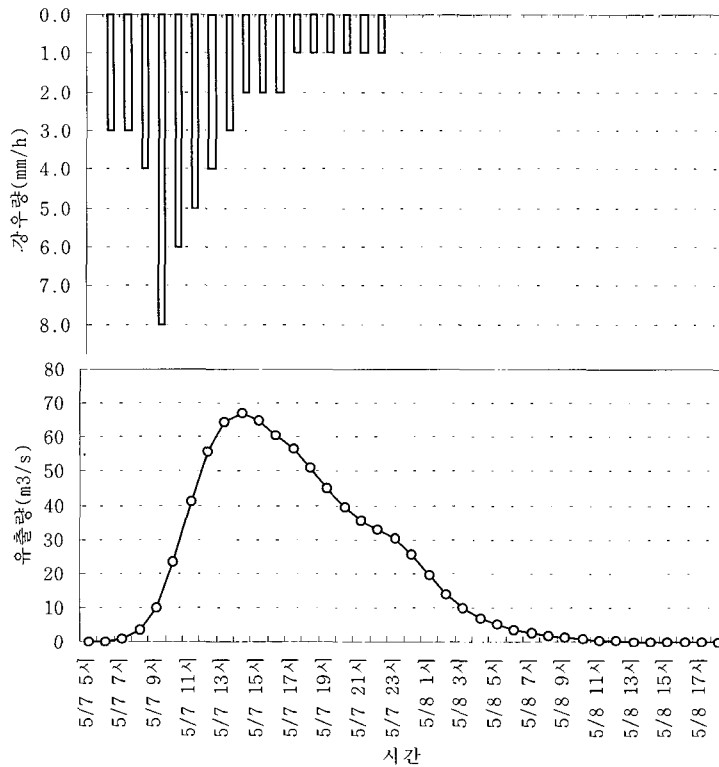
5. 강우 및 비점오염원 유출

5.1 강우 유출

강우에 따른 유출량의 정확도를 높이기

위해서는 우선 그 유역을 대표할 수 있는 강우량의 선정이 무엇보다 중요하다. 현재 하천의 설계 강우량 결정은 다양한 방법을 통해 이루어지는데 일반적으로 기상청에서 제공되는 관측 강우량을 기준으로 결정하게 되는 것이 통상적이다.

준 분포형 모형을 이용한 비점오염원 유출모델링 및 관리
-삼척 오십천을 중심으로-



[그림 8] 강우에 따른 수문 유출곡선

오십천을 포함한 삼척시 관내의 강우량 관측은 1971년 근덕면에 위치한 관측소에서 농업기상관측을 주 목적으로 실시하여 1992년에 자동기상관측시스템(AWS, Automatic Weather System)으로 관측, 전환하였으나 1995년에 기상관측이 종료되어 1992년부터는 동해기상대에서 기초 자료를 축적하여 그 역할을 담당하게 되었다(최종인 외, 2003). 그러나 동해기상대는 유역 하류의 평지에 위치하고 있어 고도 차이에서 발생하는 산지 하천의 강우 특성을 반영하지 못하므로 도계 읍사무소에 설치되어 자료를 축적하고 있는 강우 자료를 이용하였으며 이에 따른 유출 결과는 [그림 8]과 같다.

5.2 비점 오염원의 유출 및 관리방안

유역에 분포하는 비점오염원의 부하가 수역에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 이들의 분포가 각각의 오염의 유출 과정을 명확히 할 필요가 있다. 일반적으로 오염 유출량과 유량과의 관계는 다음과 같이 양변에 log를 취하여 나타낼 수 있다.

$$\log L = a \cdot \log Q + b \quad (3)$$

$$L = 10^b \cdot Q^a \quad (4)$$

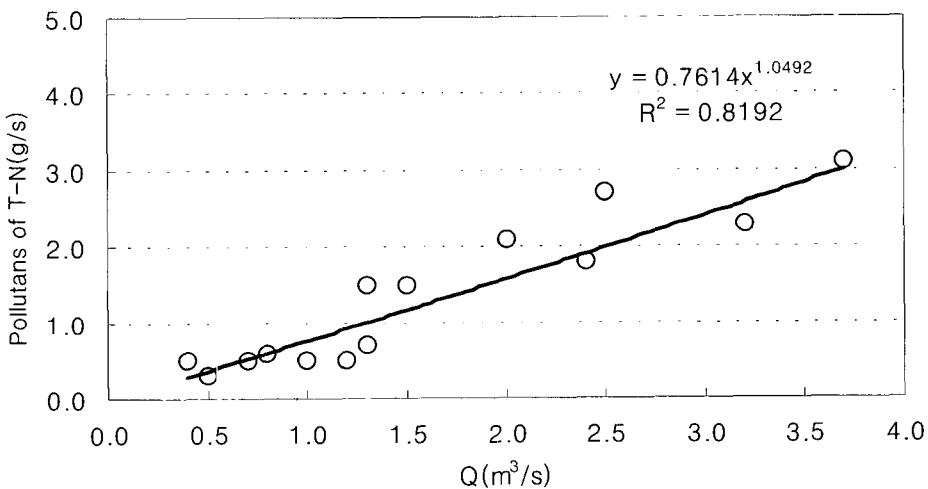
또는,

$$L = aQ^b \quad (5)$$

여기서, L:오염 부하량(g/s), Q: 유량(m³/s), a, b는 각 유역의 특성인자

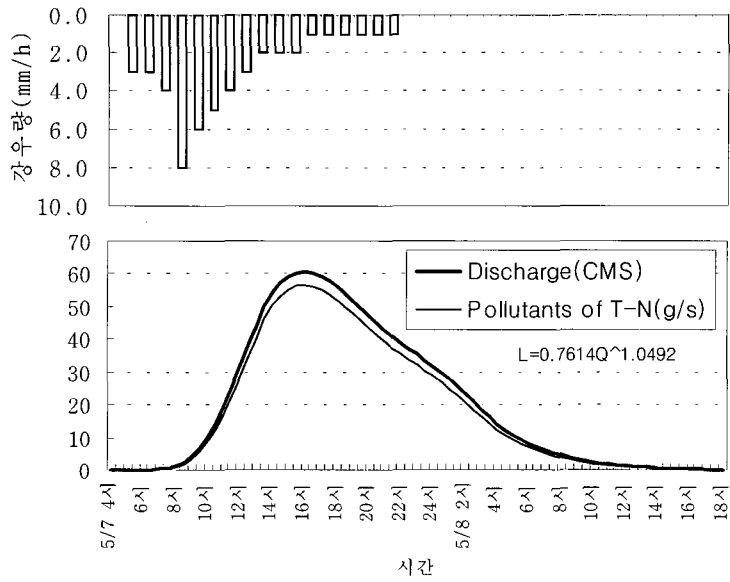
강우에 따른 비점 오염원의 유출을 평가하기 위하여 하천의 유량변동(2002년 7월~9월)에 따른 비점 오염원 유출량을 계측하여 [그림 9]와 같은 회귀곡선식을 구하였다. 본 유역의 갈수유량을 약 0.55m³/s인 것을 고려하면 [그림 9]는 강우에 의하여 유역에 분포하는 비점 오염원의 유출로 인하여 하천의 수질이 크게 좌우됨을 알 수 있다. 또한 [그림 10]은 2004년 발생한 강우 이벤트를 대상으로 산정한 강우 유출에 따른 비점오염원의 계산 결과를 나타내고 있다. 이와 같이 강우에 의한 비점 오염원의 유출은 유역의 토지이용 형태, 전일강우의 조건, 강우의 크기 등에 직접적인 영향을 받는다고 볼 수 있다. 이에 대한 대책으로는 농경지의 경작형태의 변경, 친환경 경작시스템의 도입, 축산 지역의 비점 오염원의 배출 기준 강화 등과 같이 제도적인 비구조적 측면에서의 관리 방안과 초지 여과대 조성, 토양침식 지역의 식생, 우

수의 저류조 설치 등 유역에서부터 수역으로의 유입을 적극적으로 억제하는 구조적인 대응방안이 있다(한국환경정책평가연구원, 2002, Kang, 2004). 이러한 구조적인 방안은 최근 빈번한 홍수피해의 발생 증가 경향을 볼 때 유역의 보수 기능을 증가시키는 차원에서 보다 효과적인 방안이라고 고려된다. [그림 11]은 종합적인 수환경 관리 방안의 일환으로 농경지의 농수로 단을 낮게 유지함으로써 강우유출에 따른 홍수 유량을 일시적으로 저류하여 첨두유량(peak discharge)을 순차적으로 방류되게 하여 하류부의 부담을 줄임과 아울러 비점 오염원의 초기부하(first flush)를 경감시키는 역할을 나타내고 있다. [그림 12]는 폐광지를 이용하여 홍수유량과 비점오염원을 동시에 경감시키는 저류지를 나타내며 [그림 13]과 [그림 14]는 하천 하류부의 소하천에 있어서 자연 친화적으로 조성된 수량 및 비점 오염원 삭감 저류지를 나타내고 있다.

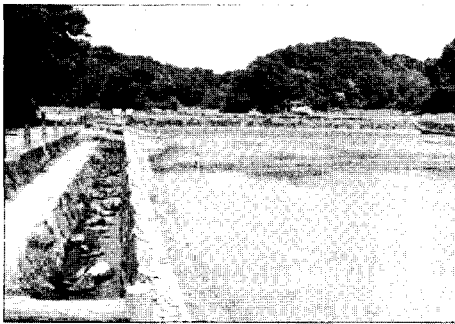


[그림 9] 오염 유출량 및 유량과의 관계

준 분포형 모형을 이용한 비점오염원 유출모델링 및 관리
-삼척 오십천을 중심으로-



[그림 10] 강우 및 오염 유출량 계산 결과



[그림 11] 농경지에 의한 저류



[그림 12] 폐광산지를 이용한 저류지



[그림 13] 저류지 유입부



[그림 14] 저류지 유출부

6. 결 론

최근 하천관리가 종래의 치수 일변도에서 하천 환경을 동시에 중시하는 자연하천 복원으로 하천에 대한 인식이 전환되고 있는 추세로 볼 때 수역에 있어서 양호한 수환경을 유지하는 것은 무엇보다 중요한 요소이다. 따라서 유역의 상태를 적절히 모니터링하여 수역의 수질변화에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것은 불가피하다. 이와 같은 목적을 달성하기 위한 방법으로 본 연구에서는 유역으로부터 오염 발생량 유출로부터 수역을 연계한 통합적인 수질예측 기법과 관리방안에 대하여 검토하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 강우에 따른 유출과정을 효과적으로 모의하기 위하여 등고선 데이터로부터 준 분포형 DEM을 구축하여 유역의 특징을 고려한 강우-유출량을 산정하였다.
2. 비점 오염원의 산정에 있어서 중요한 강우-유출량은 종래의 집중형 모형에서 잔류유역을 포함한 유역의 물리적 매개변수를 반영하고 있으므로 향후 범용적으로 활용됨을 시사하였다.
3. 강우에 따른 비점 오염원의 산정은 실제 하천에 있어서 오염부하량 및 유량(L-Q식)과의 비례식에 기초하고 있으므로 실제 값과 근사한 결과치를 반영하였을 나타낸다.
4. 본 연구에서 제안된 방법은 유역과

수역의 수환경을 연속적으로 모의계산하고 있으므로 신뢰도를 향상시킬 수 있는 하천자료가 충분하게 축적된다면 향후 효과적인 수질관리에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- 김성준, 2002, “수자원관리에서 분포형 수문모형링의 역할”, 한국수자원학회지 35(2), pp.45-56.
- 김성준, 2002, “분포형 수문모형의 구축, 보정 및 검증”, 한국수자원학회지 35(4), pp.55-65.
- 최종인·강상혁, 2003, “태풍 루사·매미에 의한 오십천 홍수유출 특성과 피해 저감방안”, 삼척대학교 소방방재연구소.
- 한국환경정책평가연구원, 2002, “농업지역 비점오염원 관리방안 연구”.
- AO, T., Takeuchi, K., and Ishidaira, H., 2001, On the method of generating artificial stream networks of large river basins and its effect on runoff simulation., Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 45, No. 45, pp.139-144.
- Fujita A., Daitou, H., and Ichigawa, Y.,2001, A real time dam inflow prediction system based on distributed rainfall runoff model, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 45, No. 45, pp.115-120.
- Kang, S.H., 2004, Index of biological integrity for water environmental assessment of nature-friendly river work, Korean Society Environmental Engineers, Vol.9(4), pp.168-174.
- Lu, M., Koeke T., and Hayakawa, N.,1989, A rainfall-runoff model using distributed data of radar rain and altitude, JSCE, Vol. 411(II-12),pp.135-142.

준 분포형 모형을 이용한 비점오염원 유출모델링 및 관리
-삼척 오십천을 중심으로-

- Noguchi, M., Nishida, W. and Mizuno, Y., 2000, Prediction of nitrogenous pollutant runoff due to stormwater., International symposium of integrated environmental management, Nagasaki University and Kangwon National University.
- Noguchi, M., Nishida W., Kang, S. H., Mizuno, Y., and Yashiro, M., 2001, Pollutant runoff mechanism from watershed under the rain condition and its modeling,, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 45, No. 45, pp.61-66.
- Qiang L., Tamai N., and Huang G., 1999, A grid-based stream-structure model for large-scale watershed, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 45, No. 43, pp.19-23.
- Wu, J. S., Allan C. J., Saunders W. L., and Evett J. B., 1998, Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff, ASCE, Vol.124(7), pp.584-592.