

# 소유역의 토지이용에 따른 비점원오염 부하량

## Nonpoint Source Pollution Loadings from Land Uses on Small Watersheds

박 승 우\* · 류 순 호\* · 강 문 성\*\*  
Park, Seung Woo · Yoo, Sun Ho · Kang, Moon Seong

### Summary

Nonpoint source (NPS) pollution from small watersheds has recently been brought into attention as a potential pollutant to streams and tributaries, as majority of them are experiencing water quality degradation. This necessitates the quantification of NPS loadings from agricultural and forested lands. And this study attempts to quantify daily loadings from forested and farm lands using hydrologic and water quality monitoring. The hydrologic monitoring program consists of five water level gauging stations along creeks and stream at the Banweol reservoir watershed having 1220 hectare in size. Water samples were taken and analyzed periodically at the streamflow gaging sites and tributaries. Soil samples were also taken and the chemical constitutes analyzed. The primary results indicate that the major sources of pollution were small villages and dairy farms on the watersheds, constituting two-third of total nutrient loadings to the reservoir. However, the loadings from paddies and upland areas may cause a problem to the water quality of the reservoir and stream as the measured levels of total nitrogen and phosphorus are not low enough to ignore. Further studies are needed to quantify the effects of landuses and treatments at a watershed scale.

### I. 서 론

농업 유역의 오염물질은 강우-유출과정 중 경지로 부터 지표유출에 용해되거나, 토사에 부착되어 유실 토양과 함께 하천에 유입되어 하류로 운송된다. 이와 같은 오염물질은 생활

오수나 공장폐수 등과 같이 일정한 배출구로 부터 유출되는 점원 오염(point source pollution)과 구분하여 비점(nonpoint source, NPS) 오염이라 한다. 즉, 점원오염은 도시나 공장 등에서 취수한 물을 쓰는 과정에서 오염 되어 일정한 배출구를 통하여 하천으로 유입

\* 서울대학교 농업생명과학대학

\*\* 서울대학교 대학원

키워드 : 토지이용, 비점원오염, 확산오염, 오염 부하량, 원단위부하량

되는데 반하여, 비점오염은 강수로 인한 지표 유출이나 농경지의 관개 배수시 잉여수 등과 함께 배출되는 것이며, 그 발생원이 불분명하기 때문에 확산오염(diffusive pollution)이라고도 한다.

농업 비점오염의 주요 물질은 농경지에 살포된 유기물질, 비료, 농약 등으로 이루어진다. 이들 물질은 유출과 함께 유역 전체로 부터 배출되므로, 그 총량이 커서 강이나 호수, 저수지, 댐, 연안 등의 수체(water body)에 대한 수질오염의 주요 원인이 되기도 한다(Park et al., 1994). 또한, 박충현 등(1996)은 우리나라 하천, 호수 등의 수질오염원으로 농경지를 최우선 순위로 평가하였다. 그밖에도, 강우, 유출과정에서 지면으로 부터 침투수와 함께 지하수를 오염시키게 된다.

농경지 비점오염의 주요 원인 물질인 화학비료와 농약의 사용량은 해마다 증가추세로서, 1994년 현재 연간 약 400kg/ha의 화학비료를 시비하고 있는데, 이 양은 세계 평균 시비량인 99kg/ha나 미국의 평균시비량 94kg/ha의 4배 이상의 양에 해당한다. 또한, 제초제, 농약 등의 사용량은 성분 기준으로 '84년의 290품목 16.7천ton에서 '94년에는 무려 568품목 26.3천ton으로 크게 증가하였다(농림수산부, 1995).

환경부(1995)의 비점오염 원단위 추정결과는 T-N의 경우 도시지역은 7.67kg/ha, 논에서는 2.2kg/ha, 밭은 0.kg/ha 등으로 발표하였다. 이와 같은 원단위 부하량으로 부터 전국의 T-N 부하량 전망에서는 2001년을 기준으로 생활배수에 의한 일 추정량은 367ton, 축산배수량은 97ton 등이며, 비점오염원에서는 일 95ton 등으로 예상하고 있다(박충현 등, 1996).

그러나, 유역 규모에서의 비점오염량은 오염원에서 배출되는 양 중 운송과정에서 퇴적이나 그밖의 생화학적 요인에 의하여 소모되

어 실제로 하천에 도달하는 양이 작으므로, 유역 규모에 있어서의 오염물질 부하량에 대한 연구가 필요하다. 또한, 현재까지는 원단위 부하량을 기준하여 측정값과의 비율을 유달출 등의 개념을 적용하는 경우가 많으나, 보다 체계적인 자료의 구축과 유역에서의 물질순환 등에 대한 기작을 검토하는 일도 중요하다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 유역에서의 비점오염 부하량을 현장 측정을 위하여 시험유역을 선정하고, 수문과 수질 계측망을 구성하며, 수문조사와 수질자료를 수집·분석하고, 토지이용과 기타 원단위에 따른 오염 부하량을 측정하고, 그 결과를 고찰하는데 있다.

## II. 연구방법

### 1. 시험유역의 개요

본 연구의 대상유역으로는 경기도 안산시 반월동에 위치한 반월저수지의 상류 유역을 선정하였다. 반월 유역은 1986년 이래 서울대 농생대 농공학과에서 수문관측을 실시해오고 있으며, 비교적 장기간의 정교한 수문 조사 자료를 보유하고 있으므로 본 연구의 대상 유역으로 선정한 것이다.

반월 저수지 유역은 경기도 서남쪽 지역인 안산, 군포, 안양시의 경계점에 위치한 수리산 남쪽기슭의 유역 면적 약 12km<sup>2</sup>로부터 배수되는 곳으로, 반월저수지를 중심으로한 상하류 인접 유역이다.

반월 저수지 유역의 토지이용상태는 77%가 산림이며, 약 18%가 논·밭 등의 농경지, 그리고 기타 도로, 자연부락 등이 산재해 있다. 유역 상류 부분은 개발제한구역으로 토지의 형질이 비교적 잘 보전되고 있으나, 하류 부분에서는 고속도로 건설, 도시 확장 등으로 빠르게 변모하고 있는 지역이다.

대상 유역은 안산-금정간 전철과 안산-신갈

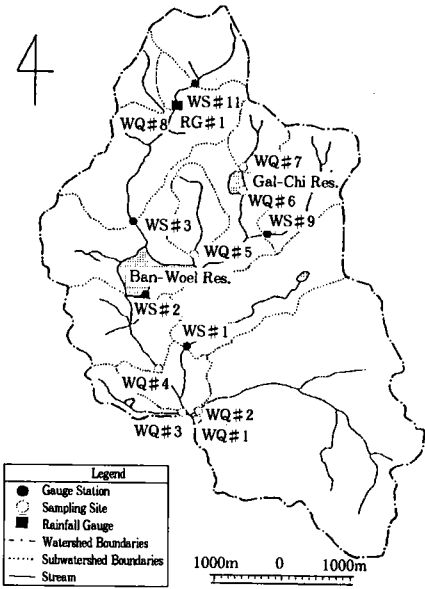


Fig. 1. Monitoring network within the Banwoel watershed

고속도로, 서해안고속도로 등이 위치하거나 현재 건설 중에 있다. 수원으로부터 약 8km에 위치하고, 교통이 편리하여 반월저수지는 낚시 등 친수성 여가활동으로 이용되고 있으며, 유역내 사찰, 교회 등 종교 단체 시설이 들어서고 이로 인한 종교활동 등과 함께 유동 인구가 많은 특징을 보이고 있다.

## 2. 수문 계측망

### 가. 수문 관측점

반월저수지 유역의 수문계측망은 Fig. 1에서와 같이, 자기수위계 5점(WS#1, 2, 3, 9, 11), 자기강우계 1점(RG#1)을 설치하였으며, 토지이용상태, 영농형태 등에 따른 농업비점오염의 부하량을 측정하기 위해 각각의 세부 유역을 선정하여 산림유역, 산간지 유역, 농경지 유역, 집단 취락지 유역 등으로 구분하고 그 수문조사를 실시하였다.

Fig. 1에서는 각 수위측정 지점을 표시하고 있는데, 반월저수지 지점은 WS#2, 인접 평

탄지 유역으로 농경지의 구성비가 52%로 상대적으로 높은 WS#1, 경지가 12%이내인 반면 산림지가 87%를 차지하는 중산간지 유역으로 WS#3이 있으며, 산림지 유역은 98%가 산림지로 구성된 WS#11, 취락지 등의 비율이 4%이며, 집단 취락이 위치한 유역을 WS#9 등으로 표시하였다.

### 나. 수 위

수문 관측점의 수위는 자기수위계의 수위기록지를 판독하여 시간별 수위를 구하고, 이를 평균하여 일수위를 구하였다. 수위관측시 자기수위계의 보정을 위해 기록지 설치와 수거시 수위를 표척을 이용해서 읽고, 이 값과 수위기록지의 값을 비교, 보정을 실시하였다. 그런데, 결빙기간 중에는 자기 수위계에 의한 수위측정이 어렵기 때문에 통상 목측 등의 방법을 통해 자료를 보완하는 일이 필요하나, 이 기간 중에는 농경지에 작물재배가 이루어지는 일이 거의 없고, 또한 하천 유황 변화가 크지 않는 등의 이유로 해서 비점오염 부하량과는 직접적인 관련성이 작으므로 측정에서 제외하였다. 시험유역의 유역별·일별 수위는 박승우(1996)에서와 같다.

### 다. 유량, 저수량

수문 관측점의 수위-유량관계는 WS#1, 3, 9 등은 하천 단면을 수개의 구간으로 구분하여 각각 1점법과 2점법에 의한 유속을 측정하고, 그 결과로부터 수위에 대한 유량을 정하여, 수위-유량관계를 얻었다. 그런데, WS#11의 경우는 직하방에 설치된 낙차공의 수위-유량관계와 유속측정의 결과를 보정하여 구하였다. 일유량은 일수위로부터 수위-유량관계를 적용하여 구하였다.

반월저수지의 저수량은 WS#2지점의 자기수위계로부터 일평균수위를 구하여, 1986년에 실시한 측량결과를 근거로 한 수위-내용적 곡선으로부터 저수량을 구하였다(정하우 등, 1986).

### 3. 수질 계측망

#### 가. 수질조사점

반월 유역의 수질 조사점은 Fig. 1에서와 같이, 유량-수질 측정점인 WS#1, 2, 3, 9, 11 등의 5개 지점과 수질측점 WQ#1~8 등의 8개 지점으로 총 13개 지점으로 구성하였다.

유량-수질 측정점(WQ점)은 앞서 고찰한 수위 관측점과 동일한 지점을 선정하였는데, 수질 분석을 통하여 얻은 정성적인 자료를 바탕으로 해당 유역의 오염 부하량을 결정할 수 있도록 하였다. 특히, 반월저수지의 수질 조사점 WS#2는 저수지의 수질 상태를 측정하므로써, 오염물질의 저류량을 추정할 수 있도록 하였다. 저수지의 저류량과 단위체적당의 오염 물질 농도로부터 저수지 전체의 오염물질의 양을 결정할 수 있기 때문이다.

수질 측정점(WQ점)에서는 별도의 유황조사는 실시하지 않고, 수질 조사만을 시행하도록 하였으며, 토지이용상태 등과 축산 농가, 취락 등의 분포를 고려하여 설정하여 유역에서의 수질을 파악할 수 있도록 하였다.

#### 나. 수질표본의 채취

수질 표본의 채취는 월 2회를 기준으로 결빙기 후인 3월~11월 기간동안에 대략 2주에 1회씩 실시하여, 총 15회를 실시하였다.

수질 표본은 2l 용기를 이용하여 2병씩 수작업으로 시료를 채취하였으며, 실험실에 운반 후 즉시 냉장상태로 보관한 다음 수질 분석을 실시하였다. 이와 같은 수작업 방법에 의한 수질 표본은 대상 유역의 유량이 많지 않은 상태이기 때문에 자료의 정도를 높이기 위한 것이다.

#### 다. 수질분석방법

수질 표본의 분석은 pH, DO, 수온 등은 현장에서 측정하였으며, 부유물질, T-N, TP 등의 영양물질, 기타 수질 항목 등은 Table-1의 방법을 이용하여 수질 표본으로부터 실험실에서 정

**Table-1. Methods of water quality analyses**

Type	Item of analysis	Method of analysis	Remarks
Water Temperature	Water	Electron thermometer	Field analysis
	Temperature		
pH	pH	pH meter	Field analysis
DO	DO	DO meter	Field analysis
SS	SS	Method of weight analysis of Standard method	Lab. analysis
N	NO <sub>3</sub> -N	Ion chromatograph	Lab. analysis
	NH <sub>4</sub> -N	Kjeldahl method	
	T-N	Kjeldahl distillation	
P	PO <sub>4</sub> -P	Ion chromatograph	Lab. analysis
	T-P	Ascorbic acid reduction method	

량분석을 실시하였다. Table-1에서와 같이 수질은 9항목을 분석하였다.

### 4. 지형 및 토지이용 조사

유역의 수문, 수질 특성에 영향을 주는 인자를 파악하기 위해, 1/25,000 지형도와 정밀 토양도, 그리고 현지답사 등을 통하여, 유역 경계를 구하고, 각 측정점별 지형, 형상, 토지이용 등의 유역 지상인자를 조사하였으며, 인구와 경작면적, 가축사육두수 등의 자료를 수집하였다. 시험유역의 조사 결과는 다음과 같다.

#### 가. 지형·형상

유역의 지상인자로서 유역면적, 형상계수, 기울기 등 지상인자를 조사하였으며, 그 결과는 Table-2와 같다. Table-2에서와 같이 유역면적은 WS#11의 126ha로부터, WS#2저수지의 1220ha의 범위로서 평균 454ha였다. WS#11은 수리산 계곡에 위치하여, 평균경사가 36%인 급경사 유역을 부여주며, WS#1은 평균 2%로써 비교적 완만한 경사를 나타낸다. 한편, WS#9는 대야미리의 거주지역 하류부로서 평균 경사는 7%이다.

유역의 형상을 나타내는 형상계수는 WS#

**Table-2. The characteristics and the land use of the studied watersheds**

Watersheds	Characteristics			Land use, %			
	Area (km <sub>2</sub> )	Shape factor	Relief ratio	Paddy field	Upland	Forest	Etc.
WS#1	2.75	0.19	0.021	30	22	40	8
WS#2	12.20	0.53	0.092	12	6	77	5
WS#3	4.80	0.32	0.113	7	5	87	1
WS#9	1.67	0.34	0.069	22	17	57	4
WS#11	1.26	0.70	0.360	2	2	96	0
WQ#1	27.5	0.35	0.070	14	6	79	6
WQ#2	9.56	0.48	0.038	24	14	34	28
WQ#3	0.47	0.24	0.079	15	9	73	3
WQ#4	1.33	0.56	0.065	14	11	70	5
WQ#5	0.78	0.34	0.146	14	3	81	2
WQ#7	0.66	0.64	0.195	13	2	80	5
WQ#8	0.52	0.35	0.195	19	1	76	4
Mean	5.20	0.42	0.120	16	8	71	6

1의 경우 0.19로 비교적 긴 유역 형상을 나타낸 반면 WS#2는 0.53으로써 타원형에 가까운 형상을 보여 주는 등 유역은 다양한 지형과 형상을 갖고 있다.

**나. 토지이용**

유역의 토지이용상태 조사결과는 Table-2와 같다. WS#11은 96%의 산림지으로써, 계곡 상류부의 약간의 경지를 제외하고는 수생상태가 양호한 산림으로 구성되었다. WS#9는 대야미 주거지역 하단부로서 주로 주거지로 구성되며, 기타는 경지, 산림 등의 토지이용을 나타내고 있다. 한편, 반월저수지 유역은 산림 87%, 경지 12% 등으로 전국 평균에 비하여 산림 구성비가 높은 특징을 보였다.

**다. 수문학적 토양군**

반월저수지 유역의 토양분포는 미국 SCS 수문학적 토양군 분류기준에 따라 구분하였다. 수문학적 토양군은 토양의 배수상태에 따른 구분방법으로 정밀토양통의 해설을 참조하여 구분한 것이다. 유역별 수문학적 토양군의 분포는 박승우 등(1996)과 같다. 반월저수지

유역의 경우, 수문학적 토양군은 A, B, C가 각각 80.9, 18.6, 0.5%를 나타내고 있어, 유역 내의 토양이 침투율이 높아 배수가 매우 양호 혹은 양호 상태를 갖는다.

**라. 인구와 가축사육 현황**

Table-3은 반월저수지 수문·수질 측정의 인구와 가축사육현황을 나타낸 것이다. 유역내에 거주하는 인구는 유역면적이 1,220ha인 WS#2측점이 3,397명으로 가장 많이 차지하고 있으나, 인구밀도는 유역면적이 167ha인 WS#9측점이 2,710명으로 높게 나타났다. 이들로 부터 배출되는 생활오수가 하천으로 유입되고 있어, 반월천 상류 지천에서는 심한 오염을 나타내고 있다.

시험유역의 총 축산능가는 99농가이며, 주요 소유역별 가축사육 현황은 Table-3에서와 같다. 이와 같은 축산 능가는 대부분 별도의 오수처리장을 설치하지 못한 실정으로, 축산 오수의 일부가 배수구거를 통해 소하천으로 유입되고 있었다. 이로 인하여, 유역의 상류부에 위치한 갈치저수지의 경우는 심하게 오염되고 있으며, 하류 반월천 상류의 오염원이 되고 있다.

**Table-3. Status of population and livestock**

Station	Population	Korean Cattle	Beef Cattle	Dairy Cattle	Pig	Deer	Poultry
WS# 1	1,137	23	70	20	1,340	14	115
WS# 2	3,397	11	558	21	160	149	190
WS# 3	150	1	0	0	0	137	15
WS# 9	2,710	2	135	16	0	0	0
WS#11	0	0	0	0	0	0	0

**III. 결과 및 고찰**

**1. 시험유역의 수문특성**

반월저수지 유역의 기상자료는 8km 동남쪽에 위치한 수원측후소의 자료를 적용하도록 하였다. 다만, 반월저수지 유역의 강수량은

RG#1의 측정자료를 적용하고, 수원측후소의 강수량과 상관관계를 이용하여 결측기간의 자료를 보정하였다. 반월저수지 유역의 일 강수량과 수원측후소의 일 강수량간에는 다음과 같은 관계를 보였다.

$$R_B = 0.61 + 0.83R_s \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $R_B$ =반월저수지 유역의 일강수량(mm),  $R_s$ =수원측후소의 일강수량(mm)이다. 식(1)의 결정계수  $R^2$ 의 값은 0.79였다.

반월저수지 유역의 수문계측망에 대한 수위-유량관계는 유역별로 각각 Table-4와 같았다. 반월저수지의 저류량은 수위로 부터 수위-내용적 관계를 이용하여 일 저류량을 구하였다.

**Table-4. Stage-discharge relationships**

Station	Rating curve	R <sup>2</sup>	Remarks
WS# 1	Q=0.0402 h <sup>0.5785</sup> (h<0.08)	0.992	
	Q=6.7529 h <sup>2.5123</sup> (h>0.08)	0.997	
WS# 3	Q=19.4313 h <sup>3.3409</sup>	0.982	
WS# 9	Q=5.8125 h <sup>1.6720</sup>	0.920	
WS#11	Q=5.7305 h <sup>1.5</sup> + 1.6429 h <sup>2.5</sup>	0.935	

\* Q : Discharge(cm<sup>3</sup>/s), h : Stage(m)

## 2. 수 질

### 가. pH

수질샘플의 pH는 Table-5에서와 같이 6.50~9.57의 분포를 나타냈으며, WS#1, 2, 3, 9 등에서 평균 7.15, 7.81, 7.16, 7.10 등으로 중성을 보였으며, WS#11의 경우는 평균 6.92로서 기타 유역에 비하여 약간 낮았으나, 큰 차이는 없었다. pH의 변화가 큰 곳은 WS#2, WS#1 등의 순이었으며, WS#9, 11 등에서는 변동이 상대적으로 작았다.

### 나. 용존산소

용존산소(dissolved oxygen, DO) 농도는

'96년 4~6월 기간 중에 5회에 걸쳐 현장측정을 실시하였으며, 그 결과는 Table-5에 나타내었다. WS#1, WS#3 등의 유역에서의 하천의 DO평균농도가 약 10mg/l인 반면에, WS#2, WS#11 등에서는 8.6~8.9mg/l이고, 주거지 유역인 WS#9에서는 3.2mg/l로 가장 낮은 값을 보였다.

DO농도의 시기별 변화가 큰 곳은 반월저수지 지점인 WS#2 지점으로 표준편차가 3.50mg/l를 나타낸 반면, 기타 유역에서는 1.2~2.9mg/l의 범위를 보였다. 이와 같은 결과는 저수지에서는 용존산소량이 계절에 따라 변화가 큰 것을 보여준다.

WS#9은 주거지의 생활오수가 유입되므로 1.4~6.3mg/l의 범위로서 기타 유역이나 저수지의 용존산소량보다 훨씬 낮은 값을 보였으며, 반월저수지 유역의 주요 오염 부하원이 되는 것으로 나타났다.

### 다. 부유물 농도

측점별 부유물 농도는 Table-5에 나타냈다. WS#1 지점에서의 부유물 농도는 강수가 많을수록 증가하는데, 갈수기인 4월 하순에는 7.3mg/l인 반면, 65.66mm의 홍수시(7월11일)는 부유물농도가 861.4mg/l로 무려 118배 이상의 증가를 보였다. 그러나, WS#3, WS#9, WS#11 등에서는 강수에 따른 부유물질의 증가는 3.4~24.4배의 범위로서, WS#1 지점 보다 크지 않았다. 특히, 저수지 부유물 농도의 경우 계절별 최고, 최소값의 차이가 3.4배로서 가장 작은 값을 나타냈다. 이와 같은 결과는 폭우시 토양 유실량과 관계가 큰 것에 기인하는데, 농경지 면적 비율이 높은 WS#1의 경우는 표토 유실로 인한 부유물의 증가가 큰 반면에, 임상 상태가 양호한 기타 유역에서는 표토유실량이 크지 않기에 증감율이 심하지 않은 것으로 관찰되었다. WS#1 측정용 제외된 경우, 부유물 농도는 WS#9에서 평균

36mg/l로 WS#3이나 WS#11의 16~18mg/l내외의 값에 대하여 약 2배 정도 큰값을 보이는데, 이는 WS#9의 경우, 유역내의 취락 지역으로부터 생활오수가 처리되지 않고 방류되는 까닭에 부유물 농도가 높았기 때문으로 판단된다.

**라. 총질소(T-N) 농도**

Table-5와 Fig. 2는 유역별 총질소(T-N) 농도의 측정 결과를 나타내고 있다. WS#1지점에서는 T-N은 평균 5.3mg/l, WS#2의 경우는 2.2mg/l, WS#3에서는 2.47mg/l, WS#9는 19mg/l, WS#11에서는 3.43mg/l 등의 변화를 보였다.

Fig. 2와 같이 유역내에서의 계절별 T-N농도의 변화는 우기인 7월경에 비교적 낮은 값을 보이고 있으며, 10월부터 이듬해 5월까지의 갈수기에는 증가하는 경향을 나타냈다. 계절별 변화폭은 WS#1은 1.4~7.0mg/l로서 약 5배 정도의 차이를 나타냈으며, WS#2는 1.2~3.6mg/l로서 약 3배, WS#3는 0.9~

4.9mg/l로서 약 5배, WS#9는 4.5~39mg/l로서 9배 정도이고, WS#11에서는 0.6~3.7mg/l로서 약 6배 정도의 변화를 나타냈다. 이상의 변화는 주거지의 경우, 생활오수 유입으로 상대적으로 일정한 값을 나타내나, 우기에는 유출량과 혼합되어 농도의 변화폭이 큰 상태를 보여주는 것으로 사료되었다. 기타 유역에서는 연중 비교적 일정한 값을 보이고 있었다.

한편, WS#11 지점은 수리산 계곡 부분으로 당초에는 2mg/l의 T-N농도를 나타냈으나, 조사기간 중에는 최고 9.5mg/l까지 높은 값을 나타내기도 하였는데, 이는 측점 직상류부분에 유락지가 새로 건립되어 하천에 직접 폐기물을 방류한데 따른 결과로 보인다. 이와 같이 소유역의 수질은 대부분 생활오수나 축산오수 등을 직접 하천에 방류하는 경우, 즉각적인 수질오염으로 나타나는 것을 보여주며, 유역의 최적관리를 실시할 경우, 하천수에 폐수가 직접 방류되는 것을 방지하는 장치를 고려해야 함을 알 수 있다.

**Table-5. The results of water quality constituents from subwatersheds**

Station	Period (No.)	Item	pH	DO	SS	T-N	T-P
				mg/ℓ			
WS#1	95/5~96/6 (13)	Min./Max.	6.20/8.86	5.93/13.10	861.43/7.29	1.44/9.32	0.16/1.28
		Mean	7.15	10.82	98.23	5.30	0.63
		STD	0.79	8.91	226.74	2.15	0.32
WS#2	95/5~96/6 (9)	Min./Max.	6.40/9.57	4.64/12.05	9.40/73.33	1.24/3.61	0.05/0.53
		Mean	7.81	8.89	21.26	2.20	0.23
		STD	1.23	3.50	19.96	0.85	0.18
WS#3	95/5~96/6 (8)	Min./Max.	6.40/8.77	9.26/11.50	4.00/43.33	0.88/4.90	0.02/1.82
		Mean	7.16	10.18	16.16	2.39	0.41
		STD	0.76	1.17	15.48	1.14	0.53
WS#9	95/5~96/6 (12)	Min./Max.	6.30/7.91	1.47/6.30	5.80/141.67	4.52/38.98	0.71/7.95
		Mean	7.10	3.16	36.45	18.97	3.27
		STD	0.53	1.91	37.67	8.45	2.31
WS#11	95/5~96/6 (12)	Min./Max.	6.30/7.49	5.54/10.63	4.95/45.00	0.64/9.46	0.02/0.96
		Mean	6.92	8.55	18.52	3.39	0.18
		STD	0.46	1.91	13.37	2.87	0.26

마. 총인(TP) 농도

TP의 농도는 Table-5와 Fig. 2에서와 같이, 유역별로 대략 0.4~3.3mg/l의 범위로 전반적으로 높은 값을 나타냈다. WS#1의 경우는 평균 0.6mg/l, WS#2는 0.2mg/l, WS#3은 0.4mg/l, WS#9에서는 3.3mg/l, WS#11은 0.2mg/l등의 값을 나타냈다. 즉, 산간지 유역인 WS#11의 TP농도와 취락지 유역인 WS#9과는 약 18배의 농도 차이를 나타내고 있다. 이와 같이, 총인의 농도는 취락지에서의 생활오수에 의한 TP의 배출량이 가장 높은 농도로서 T-N에서와 같이 유역의 주요 오염 부하원이 되고 있음을 알 수 있었다

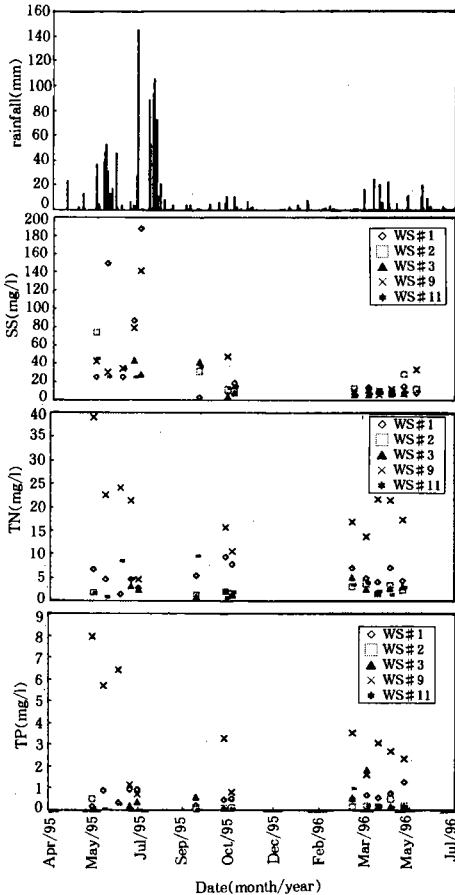


Fig. 2. The changes of SS, T-N, T-P

3. 유사량

가. 유량-부유물농도의 관계

Table-5에서 살펴본 바와 같이 시험유역의 부유물 농도는 시기별로 많은 차이를 보였는데, 그 원인은 폭우에 의한 유출 때문이었다. 시험유역의 유량과 부유물 농도의 관계는 회귀분석을 시도하였다. 유량-부유물 농도의 관계를 전대수지에 표시하여 본 결과, 부유물 농도는 유량과 지수적 증가를 나타내고 있었기 때문에 식 (2)을 기본 모델로 하여 측정별 상수와 지수를 구하였다.

$$S = c Q^{e_1} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, S=부유물 농도(mg/l), Q=유량 (m<sup>3</sup>/s), 그리고 c와 e<sub>1</sub>=상수와 지수이다.

회귀분석 결과는 Table-6에 표기한 바와 같이 유량이 증가함에 따라 부유물 농도가 증가하는 경향을 나타내었다. 회귀계수 R<sup>2</sup>의 값은 WS#1, 3에서 각각 0.53, 0.43이었으며, 기타 유역에서 0.64의 값을 보였다.

한편, 유역별 유량-부유물 농도의 관계는 해당 유역의 대표값으로 간주하기에는 관측횟수가 많지 않았으며, 앞으로 지속적인 현장 관측을 통하여 보완해 갈 필요가 있었다.

나. 유역별 유사량

유역별 유량-유사량 농도 관계와 1995년도의 일 유량자료를 이용하여, 유역별 유사량을 추정하였으며, 그 결과는 Table-7에 나타내었다.

유역의 부유물은 측정기간 중 WS#1에서

Table-6. Discharge-sediment concentration relationships

Station	S-Q relationship	R <sup>2</sup>	Remarks
WS#1	S=50.735 Q <sup>0.368</sup>	0.529	
WS#9	S=94.743 Q <sup>0.477</sup>	0.434	
WS#3, WS#11	S=19.511 Q <sup>0.341</sup>	0.639	



는 37ton, WS#2는 2,622ton, WS#3는 11ton, WS#9는 42ton, WS#11는 11ton 등의 범위를 보였다. 유역면적에 비하여, WS#9의 부하량이 상대적으로 큰 값을 보였는데, 생활오수의 유입으로 인한 결과였다. 이와 같은 경향은 부유물질의 부하량은 단순히 정성적으로 규정할 수 없고, 정량적으로 정의해야 하는 것을 알 수 있으며, 또한, 유역 면적이 큰 경우 부유물 농도가 낮더라도, 유사량이 많은 것은 유량이 크기 때문인 것이다.

#### 4. 총질소(T-N) 부하량

유역별 T-N의 농도는 Fig. 2에서와 같이 측정 시기별로 변화가 심하였다. 각각의 측정에서 유량과 T-N농도 변화를 도시한 결과, 유량의 변화와 T-N의 농도는 뚜렷한 경향이 없었으며, 선형과 지수함수로써 표시하도록 하는 회귀분석을 시도하였으나, 상관성이 나타나지 않았다.

각 유역별 총질소의 오염부하량은 유량과

관련성이 없으므로 총질소의 오염 부하량은 평균 농도를 기준하여 일 유량과의 양으로 추정하도록 하였다. 유역별 평균 T-N농도로는 WS#1은 5.30mg/l, WS#2, 3, 9에서는 각각 2.20, 2.39, 18.97mg/l를 적용하였고, WS#11에서는 8mg/l 이상의 농도를 제외하였을 때의 평균값인 0.18mg/l를 사용하였다.

유역별 총질소농도의 평균값과 일 유출량으로부터 구한 오염부하량은 Table-7에서와 같이, 하천의 경우 WS#1, 3, 9, 11에서 각각 10.6, 1.6, 21.9, 1.3ton이었다. 총질소 부하량은 농도 차이에도 불구하고 유역면적이 클수록 유량이 많으므로 부하량의 값이 큰 것을 알 수 있었다. 이와 같은 경향은 농업유역의 수질오염은 산재된 취락으로 부터의 생활오수도 중요하겠으나, 전체 유역으로부터 유출되는 영양물질에 의한 기여가 큰 것을 시사해주는 것이다. 그러나, 본 연구의 결과는 제한적인 수질 표본을 대상으로 한 분석 결과이며, 유량자료의 결측으로 인하여 연간 배출량을

Table-7. Pollutant mass measured the stations

Station	Area (km <sup>2</sup> )	No. of measure (day)	Discharge		Item	Mean (mg/ℓ)	Pollutant mass	
			Daily mean (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	Sum (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )			Daily mean (kg/day)	Sum (kg)
WS#1	2.75	117	17.10	2,001	T-N	5.30	90.63	10,604
					T-P	0.63	10.77	1,260
					SS	18.89	323.02	37,793
WS#2	12.20	129	1252.14	161,526	T-N	2.20	2,754.71	355,357
					T-P	0.23	287.99	37,151
					SS	16.23	20,322.26	2,621,571
WS#3	4.80	137	4.90	671	T-N	2.39	11.70	1,603
					T-P	0.41	2.00	275
					SS	16.16	79.10	10,837
WS#9	1.67	100	12.85	1,157	T-N	18.97	219.40	21,939
					T-P	3.27	37.82	3,781
					SS	36.45	421.56	42,156
WS#11	1.26	113	5.25	594	T-N	2.27	11.93	1,348
					T-P	0.18	0.95	107
					SS	18.52	97.32	10,997

분석할 수 없었으므로, 지속적인 연구를 통하여 유역에서의 총질소 부하량의 경향 분석이 필요할 것이다.

### 5. 총인(T-P) 부하량

총인의 농도변화는 유량과 상관성이 인정되지 않았으며, 그 이유는 수질 표본수의 부족으로 분석이 불가능하였기 때문이다. 따라서 총인 부하량을 구하기 위하여는 제한적이지만, 유역별 총인의 평균농도를 적용하도록 하여, WS#1, 3, 9, 11에서는 각각 0.63, 0.41, 3.27, 0.18mg/l를 적용하였고, 저수지의 경우는 WS#2의 총인 평균농도인 0.23mg/l를 적용하였다. 유역별 일유량과 총인의 평균 농도로부터 부하량을 추정한 결과는 Table-7에 나타났다. 총인의 양은 WS#1에서 1.3ton, WS#2에서 37ton, WS#3에서 0.3ton, WS#9에서 0.4ton, WS#11에서 0.1ton 등이었다. WS#2의 저수지의 경우를 제외하면, WS#1, WS#9, WS#3, WS#11등의 순으로 총인 부하량이 많았다.

이상에서와 같이, 유역의 비점오염 부하량은 집단취락지에서 처리되지 않은 생활오수로 인한 오염부하량이 매우 높음을 알 수 있었으며, 유량 측정 기간 중의 실제 오염량을 정량적으로 정의할 수 있었다. 이와 같은 오염부하량과 함께, 인접 배후지 등으로 부터 오염물질이 저수지에 유입되고, 이로 인하여 저수지의 수질 악화의 원인이 되고 있음을 알 수 있었다.

### 6. 오염발생부하량

오염발생부하량의 원단위는 장정렬(1994)이 제시한 값을 사용하였다.<sup>1-3)</sup> 이 값을 이용하여 측정별 원단위 오염발생부하량을 계산하였으며, 그 결과는 Table-8과 같다.

Fig. 3와 Fig. 4은 원단위에 의해 계산된 측정별 원단위 오염발생부하량과 실측 오염원 부하량을 나타내고 있다. WS#9는 다른 측정점에 비해 실측 오염원 부하량이 크게 나타나고 있다. 이것은 전철역과 아파트 단지 등 WS#9유역의 급속한 변화로 생활계 하수의 유출이

Table-8. Results of calculated T-N and T-P loading of the stations

Pollutant source	T-N (kg)					T-P (kg)				
	WS#1	WS#2	WS#3	WS#9	WS#11	WS#1	WS#2	WS#3	WS#9	WS#11
Land use	2,142	8,382	3,357	1,028	683	166	329	89	65	8
Domestic wastewater	1,330	4,382	260	2,710	0	186	614	29	379	0
Livestock	9,106	30,070	367	5,754	0	2,296	1,869	124	288	0
Total	12,578	42,834	3,929	9,492	682	2,649	2,811	243	732	8

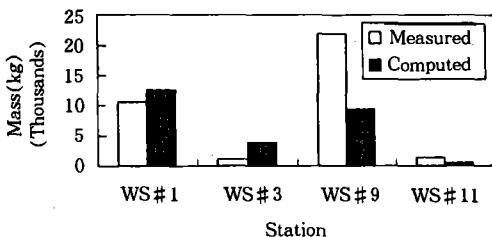


Fig. 3. Comparison between computed and measured T-N loadings

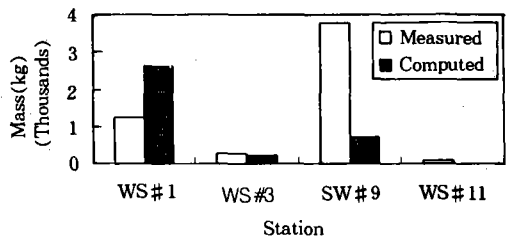


Fig. 4. Comparison between computed and measured T-P loadings

많아진 결과로 보인다.

### 7. 반월천 오염도

Fig. 5과 Fig. 6은 1995년 10월 24일의 각 하천 구간별 수질농도를 도식적으로 나타낸 반월천 오염도로서, 소유역별로 수질에 영향을 미치는 생활계, 축산계, 토지이용 등의 오염원 백분율과 그에 따른 원단위 오염부하량을 나타낸 것이다. 구간별 T-N농도는 1mg/l 미만, 1~2mg/l, 2~10mg/l, 10mg/l 이상 등으로 구분하였고, T-P농도는 0.1mg/l 미만, 0.1~0.4mg/l, 0.4~1.0mg/l, 1.0mg/l 이상 등으로 구분하여 나타내었다.

T-N은 WS#2측점인 반월저수지 유역의 원단위 부하량이 332kg/day로서 가장 큰 부하량을 보였고, 축산계 오염원의 비율이 높게 차지하고 있었다. 산림지역인 WS#11지점은 오염부하량이 6.04kg/day의 값을 보였고 오염부하정도도 낮게 나타났다. 또한, 축산에 의한

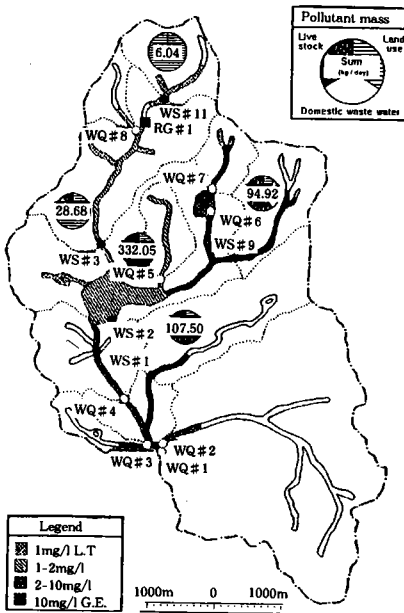


Fig. 5. Water quality map(T-N) of the watershed

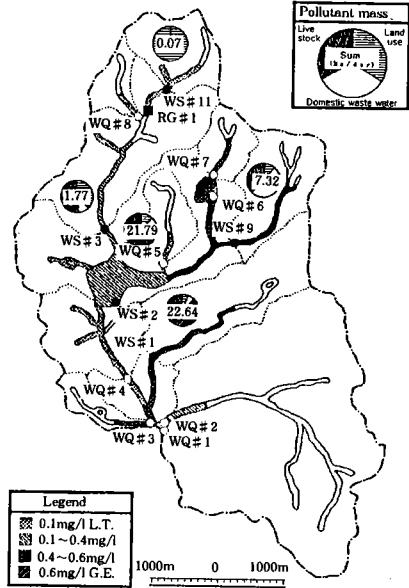


Fig. 6. Water quality map(T-P) of the watershed

오염부하량의 비율이 높은 WS#9와 WS#1측점의 T-N 농도가 높은 수질 상태를 나타내었다.

T-P는 토지이용에 의한 오염원이 배출되는 WS#11측점이 낮은 농도를 보였고, 축산계 오염원의 비율이 높은 WS#1측점이 높은 오염정도를 나타냈다. WS#9측점의 원단위 오염부하량 값이 WS#1측점보다 작음에도 불구하고, WS#9측점의 T-P 농도가 높은 값을 보이는 것은 WS#9측점이 급속한 취락지의 발달로 인해 생활계 오수가 무분별하게 방류되기 때문인 것으로 판단된다.

### 8. 토지이용에 따른 오염부하

Fig. 7와 Fig. 8은 토지이용상태에 따른 총질소, 총인의 오염부하를 비교한 것이다. 즉, 토지이용상태에 의한 오염부하를 비교하기 위하여 산림지의 농도에 대한 평탄지와 취락지의 농도를 1:1로 나타낸 것이다. Fig. 7와 Fig. 8에서와 같이, 산림지인 WS#11측점에

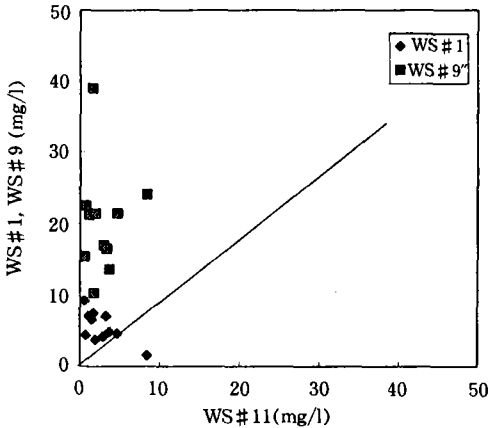


Fig. 7. Comparison of T-N concentrations between residential area and forest

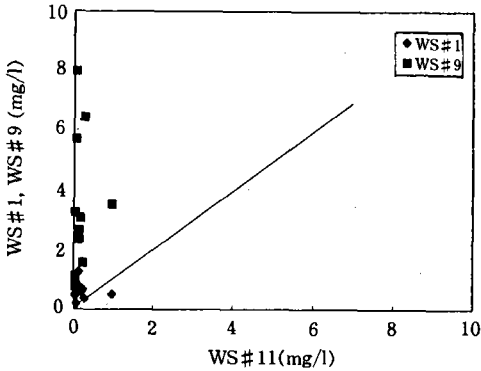


Fig. 8. Comparison of T-P concentrations between residential area and forest

비해 평탄지인 WS#1측점과 취락지역인 WS#9측점의 총질소, 총인의 오염부하가 뚜렷이 높은 경향을 보였다.

농업비점오염은 그 배출 기작의 특성이 점원오염과는 달리, 수처리장을 이용한 공학적인 처리가 불가능하거나 비경제적이다. 따라서 수질목표를 산림지의 농도로 설정할 경우, 수질에 영향을 미치는 여러 가지 기작을 조절하는 유역의 최적관리기법(Best Management Practice, BMP)에 의하여, 오염원 혹은 그 인접지역에서의 오염발생을 억제하거나, 효과적인 관리를 통해서 줄여나가야 할 것이다.

#### IV. 요약 및 결론

농업유역의 토지이용에 따른 비점오염 부하량을 조사·분석하기 위하여 반월 저수지 및 그 인접 유역을 대상으로 수문, 수질 계측망을 구성하고, 수문 및 수질자료를 조사·분석, 토양오염상태를 조사 분석하고 그 결과를 고찰하도록 하였다.

반월저수지 유역 수문, 수질오염 모니터링을 위해서, 강우 측정 1개소, 수위-유량측점 5개소, 수질측점 12개소 등을 설치하고, 연속적인 수문자료의 구축과 주기적인 수질 자료를 수집 분석하였으며, 그 결과를 바탕으로 유역 특성에 따른 오염 부하량을 측정 분석하였다.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 반월저수지 유역을 대상으로 수문, 수질, 토양오염 실태 파악을 위한 계측망을 구성하고, 대상 유역의 지상인자, 토지이용상황, 인구 및 축산현황 등 수질 오염에 영향을 주는 인자 등을 조사하여 유역의 토지이용상태 등의 특성에 따른 오염 부하량을 계량화하도록 하였다.

2) 시험유역의 기상, 수문자료를 조사 분석한 결과, 시험유역과 반월축후소 강수량의 결정계수  $R^2$ 의 값은 0.79였고, 각 수문 측정별 유량을 산정하기 위하여 수위-유량관계식을 구하였다.

3) 수질 샘플을 통해 수질을 항목별로 분석한 결과, pH는 6.50~9.57의 분포로서 대부분 중성을 보였으며, DO는 1.196~13.10mg/l의 분포를 보였으며 생활오수가 유입되고 있는 WS#9측점이 가장 낮은 값을 나타냈고, 부유물 농도는 16.16~98.23mg/l의 범위로서 유출량과 밀접한 관계를 보였다. 총질소와 총인 농도는 각각 2.20~18.97mg/l, 0.18~3.27mg/l의 범위로서 취락지역으로 부터의 오수가 주요 오염원으로 판단되었다.

4) 혐유역의 유량과 부유물 농도의 관계는 유량의 증가에 따라 부유물 농도가 증가했는데, 회귀분석에 의하면, 회귀계수  $R^2$ 의 값은 WS#1, 3에서 각각 0.53, 0.43이었으며, 기타 유역에서 0.64의 값을 나타냈다.

5) 부유물과 총질소, 총인 등의 농도와 일유량으로 부터 유역별 비점오염 부하량을 추정 한 결과 유사량은 일평균 79~323kg이었고, 총질소는 12~219kg, 총인은 0.8~38kg의 범위를 나타냈으며, 취락지역인 WS#9로부터의 일평균 부하량이 가장 많아 반월저수지의 주요 오염원은 생활오수인 것으로 나타났다.

6) 반월유역의 하천 구간별 수질 상황을 추정 한 결과 반월천 상류 구간에서는 산간지 등에서 유입되는 하천수의 총질소와 총인농도가 낮았으며, WS#9의 상류지역인 취락지구와 가축사육수가 많은 곳에서의 수질오염이 심한 것으로 나타났다.

7) 반월유역의 토지이용에 따른 총질소와 총인의 오염부하를 비교한 결과, 산림지인 WS#11측점에 비해 평탄지인 WS#1측점과 취락지역인 WS#9측점의 오염부하가 높은 경향을 보였으며, 이에 대한 유역단위의 최적 관리기법이 요구된다.

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구 조성비 지원사업(농업과학분야)중 농업과학공동기기센터(NICEM)의 대학간 공동연구지원사업(과제번호 NICEM-96-4)으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

1. 국립환경연구원, 1987. 폐수배출시설 표준

원단위 조사연구(I), 국립환경연구원보, Vol(9).

2. 국립환경연구원, 1988. 폐수배출시설 표준 원단위 조사연구(II), 국립환경연구원보, Vol(10).

3. 국립환경연구원, 1989. 폐수배출시설 표준 원단위 조사연구(III), 국립환경연구원보, Vol(11).

4. 김진택, 1995. 농업 비점원 오염모형을 위한 지리자원정보시스템 호환모형의 개발 및 적용, 서울대학교 박사학위논문.

5. 김진택, 박승우, 1994. 경사지의 경종에 따른 유출 및 토양유실에 관한 연구, 한국농공학회지, 36(1), pp. 73-82.

6. 박승우, 1996. 영농방식에 따른 농업비점오염 부하량 조사분석, 농업과학공동기기센터.

7. 박충현, 박희 경, 현인환, 1996. 21세기 물 수요를 대비한 종합수질 관리방안, '96 세계 물의 날 기념 심포지엄, pp. 71-119.

8. 장정렬, 1994. 농촌유역 수질관리모형의 개발에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.

9. 환경부, 1995. 21세기 환경비전.

10. Novotny, V. and H. Olem, 1994. Water Quality Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution. Van Nostrand Reinhold.

11. Park, S. W., S. Mostaghimi, R. A. Cooke, and P. W. McClellan, 1994. BMP Impacts on Watershed Runoff, Sediment, and Nutrient Yields, American Water Resources Association, 30(6). pp. 1011-1023.

(접수일자 : 1997년 4월 14일)