제 출 문

경남지역환경기술개발센터장 귀하

본 보고서를 "토지이용도가 다른 소유역별 수질 관리에 관한 연구"에 관한 최종보고서로 제출합니다.

연구기관명 : 인제대학교

연구책임자 : 조경제 교수(인제대 낙동강유역환경연구센터)

연 구 원 : 박재현 교수(인제대 토목공학과)

김기범 교수(경상대 해양환경공학과)

공동연구기관명 :

요 약 문

I. 제목 토지이용도가 다른 소유역별 수질관리에 관한 연구

II. 연구의 목적 및 필요성

국내의 물문제는 수자원의 부족과 수질의 악화로 요약할 수 있으며 특히 수질의 악화는 사회적인 문제가 되고 있고 수자원의 확보가 당면 과제로 나타나고 있다. 이와 같은 물 문제에 대응하기 위하여 4대강 물관리종합대책을 수립하면서 종래의 농도 규제에 더하여 목표수질 한도에서 유역배출량을 관리하는 오염총량관리제도(TMDL)를 1998년 한강수계부터 도입되었으며 제도적으로 점차 확대될 것으로 전망된다. 그러나 수질에 대한 총량관리는 주로 점오염원이 대상이 되고 있으며 강우 유출에 의해 발생하는 오염양상이나 비점오염원 부하 특성에 관한 국내 정보는 절대적으로 부족한 실정이다. 특히 원단위 또는 모델에 의한 부하량 산정에 의존도가 높고 비점오염원 분석에 있어서 기본 자료가 되고 있는 유역(watershed)을 단위로 강우유출(runoffs)에 관한 현장 자료가 많지 않다. 한편 수질 오염도에 치중하면서 수체 내 수리수문의 영향이 간과되어 왔으며 수질모델을 사용하는 경우에도 예측조건의 부족으로 특히 수문자료에 대한 신뢰성이 결여되는 경우가 많았다.

이러한 점에 착안하여 갈수기의 하천수와 강우시 강우 유출수의 수문 요소(수위-유량 곡선)와 수질 요소를 동시에 측정하고 모니터링하여 각 오염물질의 거동과 강우 유출수의 비점오염원 부하량을 평가하고져 하였다. 유역의 토지이용도가 각기 다른 유역(산림, 농경지 및 도시 유역)을 대상으로 하여, 토양 침식 등 지형적인 요인, 부유물질 또는 용존성물질, 보존성 물질 또는 비존성 물질을 모니터링하여 농도(C)-유량(Q), 부하량(L)-유량(Q) 관계를 기반으로 강우에 의한 유출부하량 또는 비점오염원 부하량을 실험적으로 산정하였으며 유역을 대상으로 하는 수질관리에 대한 방안을 수립하였다.

Ⅲ. 조사대상 유역의 개황

지리산 국립공원의 뱀사골 유역(산림 유역으로 101 km^2), 남원시 운봉읍과 인월면 일대 유역(농경지 유역으로 149 km^2)과 김해시 해반천 유역(도시 유역으로 23 km^2)을 대상으로 하였다. 지리산 일대는 강수량이 풍부하고 하천 유량이 많은 점, 남원 운봉읍과 뱀사골 유역은 임천(남강의 지류)의 상류로서 서로 인접해 있으면서 유역면적이 비슷한 점, 수질 문제로 상하류간 문제가 발생하고 있는 점(상류의 전라남도 남원시와 하류의 경상북도 함양군), 전형적인 산림 및 농촌 지역이라는 점에서 비점오염원 연구에서는 최적지로 평가한다.

Ⅳ. 연구의 내용 및 범위

우리나라는 강우가 특정기간에 집중되기 때문에 강우 유출수와 함께 유입되는 오염물질의 부하량을 정확하게 파악하는 것이 가장 중요하다. 연구의 내용과 범위는 다음과 같다.

□ 대상 유역 - 삼림, 농경지, 도시유역

□ 측정 내용

- 수문학적 요인 : 실측 수위-유량 곡선에 의한 유량 측정
- 오염원 조사 : 점오염원과 비점오염원
- 수질 모니터링 : 갈수기와 강우시 정밀 수질측정
  : 28개 측정항목

□ 분석 내용

- 유역의 토지이용도에 따른 강우 유출수의 수문학적 특성 규명
- 부하량 산정
- 비점오염원의 특성 파악
- 유역을 대상으로 하는 수질관리 방안 수립

V. 연구결과

갈수기에는 산림 및 농경지 유역을 대상으로 하였고, 강우시에는 산림, 농경지 및 도시 유역의 하천에서 28개 수질항목에 대한 농도, 유출 특성(농도-유량), 부하 특성(부하량-유량), 비점오염원 유출단위 등을 조사하였고, 비점오염원 저감방안과 유역단위의 수질관리 방안을 연구하였다. 한편 조류와 부착조류를 활용하여 수질을 평가하고 그 지표성을 검증하였다.

1. 갈수기의 하천수 수질특성

유역의 하천수를 조사한 결과 농경지 유역의 하천수의 각 수질 항목의 농도는 산림유역보다 높았다. SS, TP, PO_4^{2-}, NH_4^+, Al^{3+} 항목에서 6배 이상 높았고 SS가 가장 높았으며(평균 20배), Na^+, K^+, Mg^{2+}, 등 양이온과 SO_4^{2-} 음이온 농도 차이는 대게 4배 이하였다. NH_4^+, PO_4^{2-} 등 무기영양염의 변동이 매우 컸고 COD 등 유기물 지표는 무기영양염 보다 변동의 폭이 작았으며 시기적으로는 봄(5월)과 가을(10월)에 각 수질 지표가 상승하였다. 조사대상 지역의 산림 유역의 하천은 COD 기준 1급수를, 농경지 유역은 2~3 급수였으나 평균 2급수를 유지하였다. 하천의 부착조류가 증가하는 시기에 DO, pH 등 지표가 상승하여 조사대상 유역(임천 상류)의 하천에는 부착조류가 차지하는 비중이 매우 높았다. 한편 Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+ 등 4종류의 양이온은 6~8월에 동시에 증가하였고, Cl^-와 SO_4^{2-}음이온은 3~6월에 뚜렷이 높아 양이온과 음이온의 계절 변동이 대비되었으며, 양이온 4종류와 음이온 2종류 내에서는 조사지점과 시기에 따른 변동에 있어서 거의 차이가 없었다. 중금속 Al^{3+}은 5월과 8월에 크게 증가하였다. 이러한 수질 변동은 농경지 하천에서는 뚜렷하였으나 산림 유역의 하천에서는 그 변동이 미미하였다.

2. 강우 유출수의 수질 특성

강우 유출수는 산림 및 농경지 유역에서 강우 시 총 5회, 도시 유역에서 총 4회 조사하였다. 강우 유출수의 수질은 유역의 토지이용도, 강우강도, 강우 지속시간, 선행무강우 일수와 유출수 내 유출물질의 특성에 따라 여러 가지 양상을 띠었다. 최대강우와 첨두유량 사이 지체시간에 있어서는 산림 및 농경지 유역에서는 각

각 1.9~4.8시간 및 3.0~7.2시간이었으며 도시 유역에서는 최대강우와 첨두유량 사이에 시간 간격이 발견되지 않았다. 100 mm 이하 강수량에서 농경지:산림의 유출수 내 SS는 최대 100:1로서 산림유역의 SS는 미미하였으나 강우강도가 높고 강수량이 많을 때에는 5:1이었다. 농경지 유역의 NH_4^+와 PO_4^{2-}는 유량 이후까지 증가하였고 강우강도가 클수록 그 증가도 비례하여 최대 50배 증가하였으나 산림 유역에서 NH_4^+ 농도는 미미하나 첨두유량 이전에 최대에 달했다. 그러나 NO_3^{2-}는 500~2,500 ug/l 범위로 유량에 따른 증감이 불규칙하고 뚜렷치 않았다. SS는 첨두유량 이전에, COD, TN 및 TP는 첨두유량 직후에 최대에 달했으나 강우강도가 6 mm 이하인 강우사상에 대해서는 유량과 유출현상이 미미하였다. 강우 유출수 내 NH_4^+와 PO_4^{2-} 농도는 7, 8월에 가장 높았고, 유기물 농도는 B4 지점에서 가장 높아 계절과 지역 특성도 띠었다. Ca^{2+} 등 양이온은 농경지 유역에서는 강우시간에 따라 다소 감소하는 듯 하였으나 산림유역에서는 증가하다가 첨두유량을 깃점으로 다소 감소하였다. 유출수 내 Ca^{2+}과 Na^+가, Mg^{2+}와 K^+의 거동과 변동이 서로 일치하였다. Cl^-과 SO_4^{2-} 음이온은 양이온 보다 변동 폭이 적었고 강수량이 적을 때에는 시간대별 유출수의 음이온은 변동이 없었다. 중금속 Al^{3+}은 초기 강우이후 증가했다가 다시 감소하였으며 시기, 지점, 강우강도에 따라 변동이 심했다.

산림과 농경지유역에서는 강우 초기 오염물질이 증가하는 세척 효과가 관찰되지 않았으나 도시유역에서는 뚜렷하였으며 합류식 하수구의 월류수 조사에서는 초기세척이 몇 시간 내에 발생하였다.

3. 강우, 유출수 및 하천수의 수질

강우와 산림 계류수를 비교하면 NH_4^+와 H^+은 산림 계류수 보다 강우에서 농도가 더 높았고, 양이온과 음이온은 계류수에서 더 높았다. 산림에서 Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+의 산림하천수/강우의 비율은 각가 4, 12, 15 및 8이었고, Cl^-, NO_3^{2-} 및 SO_4^{2-}는 각각 7, 5 및 2였다. 산림토양에서 양/음이온의 세탈이 일어남으로서 산림토양은 하천수에 대하여 완충기능과 화학적 안정성을 유지하였다. 그러나 도시의 강우에는 H^+과 Cl^-이 크게 증가하였으며 농경지 유역에서는 오염원에 의해 하천수 내 이온물질이 급증하였다.

4. 오염물질의 부하특성

강우 유출수의 농도(C)-유량(Q) 관계는 유역의 토지이용도와 유출물질의 종류에 따라 여러 가지 형태를 띠었다. 산림과 농경지에서 C-Q 관계에서 초기농도는 농경지에서 높았지만 그 기울기는 서로 비슷하였으며 도시 유출수의 초기농도는 농경지보다 10여배 NH_4^+는 100여배 높았으나 C-Q 관계는 산림과 농경지 보다 그 기울기가 완만하였다. 유량 Q가 증가할수록 유기물 지표 등 대다수 오염물질의 농도는 증가하였으나 alkalinity, SiO_2, Cl^-, SO_4^{2-}는 감소하였으며 NO_3^{2-}, Ca^{2+}, K^+의 증감은 뚜렷치 않았으며 농경지 유출수에서는 TN, NH_4^+, PO_4^{2-}의 농도 증감이 불분명하였다. 도시유역에서는 초기세척 효과로 초기 농도가 매우 높아 유량 Q에 대하여 뚜렷한 증가 현상이 없거나 감소하는 경우가 많았다.

도시 합류식 하수 월류수의 오염물질의 유출량(월류 유량x농도)은 강우개시 1.5시간 후에 최대에 달했으며 6시간 이후 급격히 감소하였다. 도시 불투수층에서 초기세척 효과는 선행무강수일이 길수록 뚜렸하였다.

강우사상시 "오염물질의 농도(C)x유량(Q)"의 적산으로 부하량을 구하였으며 log L- log Q의 선형관계는 양호하였다. L-Q 선형식을 이용하여 부하량(load)을 산출하였으며 연간 비점오염원의 부하량을 산정하는데 활용하였다. 특히 SS와 TP의 L-Q 형태가 동일하여 두 물질의 이동 또는 거동은 밀접한 관련이 있음을 실험적으로 증명되었다. L-Q 관계에서 유역의 토지이용도에 따른 유출 부하량의 크기가 Al^{3+}가 가장 컸고, TN, Cl^-의 순이었으며 Mg^{2+}과 Na^+ 등 양이온은 유역 별 차이가 가장 작았다.

산림과 농경지 유역의 일반적인 강우사상에 있어서 총강수량(ppt)에 대한 오염물질(SS, COD, TN, TP)의 유출 부하량(L)은 선형관계였으며 강우강도(일 강수량 200 mm 이상)가 매우 크거나 폭우 시에는 유출부하량은 지수적으로 급증하였다. 산림과 농경지에서 비점오염원의 유출 원단위를 산출한 결과 SS, COD, TN, TP에서 각각 121 kg/ha/yr, 28 kg/ha/yr, 12 kg/ha/yr, 0.4 kg/ha/yr였고, 농경지 유역에서는 1,308 kg/ha/yr, 70 kg/ha/yr, 79 kg/ha/yr, 39.5 kg/ha/yr였다. 산림에서 유출부하량은 문헌에서 보고되고 있는 원단위 범위값 내 값이었지만 산림의 TN 원단위는 높은 편이었고, TP는 중간치였으며 SS는 매우 낮은 편이었다. 그러나 농경지에서 유출원단위는 매우 높았다. 유출 원단위는 강수량, 강우강도, 유역의 지형조

건에 의해 결정되므로 변동이 크고 가변적이다. 2002년도 지리산 지역(연강수량 약 2,300 mm)과 남원 지방의 강수량(연강수량 1,600 mm)이 예년보다 많았고 잦은 태풍과 강우강도도 높았기 때문에 단위면적 당 유출원단위값이 높게 산정되었다.

5. 조류에 의한 수질평가

식물플랑크톤의 발생량은 임천 상류 수계에서 A지구(산림유역)에서 1.4 ug/l, B지구(농경지 유역)에서는 11 ~ 17 ug/l, C지구(임천)에서는 6.9 ~ 8.3 ug/l 로서 A지구는 빈영양화, B지구는 부영양화, C지구는 중영양화 단계였다.

돌부착규조류(epilithic diatom)에 의한 수질평가를 수행하고 BOD, COD 및 TP 등 수질지표와 비교분석하여 그 효용성을 평가하였다. 부착규조류는 110여종 관찰되었으며 대표적인 혐오탁성 규조(saproxenous species)는 *Achnanthes convergens*, *A. minutissima* var. *gracillima*와 일부 *Fragilaria* 속 규조류였으며, 호오탁성 규조류(saprophilous species)는 *Navicula saprophila*, *N. subminuscula*, *N. minima*, *Nitzschia palea* 등이었다. 총 8회 조사 결과로서 Watanabe and Asai (1990)의 DAIpo 지수를 구한 결과 각 조사 지점에서 부착규조류로 구한 DAIpo 지수는 실제하천에서 측정한 BOD, COD, TN 및 TP 값과 일치하였으며, 유역내 토지이용도나 오염물질의 발생 부하량과도 잘 부합하였다. 수질이 깨끗한 지리산 소하천에서 부착조류에 의한 생물학적 수질평가를 수행한 결과 이화학적 수질 평가에서 1급 수질도 부착조류 평가로서 보다 세분화 할수 있었으며, 이화학적 평가에서 계절적 변동이 뚜렷치 않았으나 부착조류 평가에서는 수질의 계절 변동이 뚜렷하여 수질의 미세한 차이를 평가하는데 있어서는 유익한 것으로 나타났다.

6. 유역의 수질관리 및 유역관리

유역의 수질관리는 하천이나 호수의 수질 개선, 점오염원에 의한 부하량 감소와 강우유출에 의한 비점오염원 부하량의 감소방안 등이 포함될 수 있으며, 다른 한편으로는 발생원에서 그 양을 감소시키는 방법, 표토 등 침식을 억제하는 방법, 불투수층을 감소시키는 방법, 오염물질이 하천이나 호수로 유입 최소화시키는 방안 등으로 접근할 수 있다.

비점오염원의 주요 관리대상인 농경지 유역은 식생여과대 또는 우수로 등에

의한 표토 안정화 및 침식억제, 영농방법을 개선시킴으로서 오염물질의 유입을 감소시킬 수 있다. 강우 유출수를 일시적으로 저장시키는 저류지(basin) 또는 습지(wetland), 농경배수로 또는 수변 식생대의 조성도 방안이 될 수 있다. 생활하수 등 점오염원은 소규모 습지 또는 저류지(예를 들면 미나리 밭) 등으로 유입시켜 체류케 함으로서 정화하는 시설을 늘려야 한다. 국내에서 정화시설로 많이 활용되고 있는 접촉산화처리시설보다는 자연환경을 있는 그대로 활용하는 것이 필요하다. 한편 농경지와 축산단지에서 발생하는 강우유출을 감소시키기 위하여 축산단지 주변, 밭의 하단, 하천 주변의 오염발생지(critical source area, CSA) 등에 다양한 차단띠(vegetation strip 등)를 설치하여 부유물질의 하천 유입을 막아야 한다. 수질관리는 하수의 찻집 처리를 전제로 하는 것이며 처리시설만으로 목표수질을 달성하기가 어려우며 오염물질과 부유 물질의 하천 유입을 최소화시켜야 한다. 부지확보 문제가 있기 때문에 가능한 소규모 시설을 늘리되 논이나 하천 주변의 저지대, 경작지와 경작지 사이 공간을 활용할 수 있다.

한편 뱀사골 산림 유역도 강수량이 100 mm 이하일 때에는 강우에 따른 오염물질의 유출량은 미미하였으나 강수량이 150 mm 이상 강우강도가 높은 경우에는 유출부하량이 상당하기 때문에 강우강도가 높은 경우에는 대책이 필요하다. 그러나 지리산은 다른지역과 비교해서 강수량이 많고 폭우가 빈번한 곳으로 하천의 유속이나 강우 유출량을 감소시킬 수 있는 기술적 방안도 연구되어야 한다.

남원시 운봉 인월 일대 유역은 전형적인 농촌 지형이고 점오염원과 비점오염원이 비교적 풍부한 곳으로 국내에서 유역단위 수질관리의 "시범 유역"으로 운영하기에 좋은 조건을 가지고 있다. 강수량이 풍부하여 하천유량이 확보되고, 지리산 산림유역을 대조 시험구로 사용할 수 있으며, 공단이 없고 개별공장의 숫자도 비교적 적기 때문이다. 한편 조건이 다른 2개의 소유역 (운봉읍과 아영면)으로 구분하여 실험설계를 할 수 있는 잇점도 있기 때문이다.

Vl. 연구결과의 활용계획

본 연구과제는 기술개발 과제보다는 수질관리에 관한 조사연구 성격을 가지고 있다. 국내 "오염총량관리"에서 기준 유량을 10년 저수량으로 하여 허용부하량을

산정하기 때문에 강우유출에 의한 비점오염원은 포함되지 않으나 유역 단위 수질관리는 궁극적으로 비점오염원 저감방안이 이루어져야 가능하게 될 것이다. 본 연구결과에서 도출된 C-Q 및 L-Q 관계식은 자료가 다소 보완되고 토지이용도에 따른 수정이 이루어진다면 부하량을 실험적으로 산정하는데 활용도가 매우 높을 것이다. 유량 자료가 없다면 본 연구결과에서 얻어진 강수량(ppt)-부하량(L) 관계식을 활용하더라도 부하량에 대한 정보를 얻을 수 있을 것이다.

향후 수질관리는 유역관리의 형식을 띠게 될 것으로 전망되는데 유역관리는 유역의 자연환경과 생태 뿐 아니라 경제활동까지 포함하는 종합적인 관리로서 성격을 가지고 있으며 그 중에서도 자연환경과 오염관리는 결과적으로 경제적인 이득을 가져오는 것이라야 할 것이다.

Ⅶ. 정책적인 제안

오염총량관리를 포함하는 유역의 수질관리 계획을 수립하고 목표를 달성하기 위해서는 사전 준비해야 할 것과 장기적으로 준비해야 할 것은 다음과 같다. 유역의 수질관리를 수행하기 위해서는 강수량 측정지점을 늘리고 하천의 수위를 기록하는 수문학적 모니터링 체제를 보강하고 대폭 증가시켜야 한다. 유역(watershed)에 관한 정보를 전산화하여야 하고 GIS 자료화할 필요가 있으며 국가에서 제공하는 시스템이 이루어져야 한다. 오염총량관리에 있어서도 이러한 것들이 잘 구비될 때 성공할 수 있을 것이다.