*Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 20, No. 2, pp.151-156 (2004)*

# 오염총량관리를 위한 의사결정 지원시스템 적용

**이혜영 · 박석순†**

이화여자대학교 공과대학 환경학과

# Application of a Decision Support System for Total Maximum Daily Loads

Hye-Young Lee · Seok-Soon Park

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

**Abstract** : A decision support system, Watershed Analysis Risk Management Framework(WARMF), was applied to the Kyungan Stream watershed, a tributary of Lake Paldang, for calculation of total maximum daily loads(TMDL). The WARMF system was developed by Systech Engineering, USA, and has been successfully used in several watersheds, for TMDL studies. The study area was divided into 14 sub-basins, based on digital elevation model(DEM). The integrated watershed and stream model of WARMF was validated by flow and BOD data measured during the year of 1999. There were reasonable agreements between model results and field data, both in water flow and BOD. The validated Kyungan WARMF was extensively utilized to study the quantitative relationship between waste loads and receiving water quality. Based on TMDL guideline at Paldang Lake and Kyungan Stream, the water quality criterion were set to be 3.0mg/L, 3.5mg/L, and 4.0mg/L at the watershed outlet. The allowable waste loads of BOD, both from point and non-point sources, were determined at each water quality criterion. From this study, it was concluded that the WARMF provided several advantages over the conventional application of watershed and stream models for TMDL study, such as time variable simulations, multiple possible soutions, and reduction loads for goal water quality, etc.

**keywords** : Total Maximum Daily Loads, Water Quality Model, Decision Support System, Waste Load Allocation, WARMF, Kyoungan Stream

## 1. 서 론

지금까지 우리나라에서 시행되어 온 수질관리제도는 배출원에 대해 일정한 규제치를 적용하는 농도규제 방식으로, 집행 및 관리가 쉽고 형평의 원칙을 준수한다는 장점이 있다. 그러나 배출수가 증가할 경우, 개별 오염원들이 규제치를 준수한다하더라도 해당수계의 자정능력을 초과하는 경우가 발생하게 된다. 따라서 대상수계의 수질이 목표수질을 유지하기 위하여 유역에 위치한 모든 오염원이 수질에 미치는 영향을 파악하고 관리하는 제도의 필요성이 오래 전부터 대두되어왔다.[1-4)]

최근 전국 4대강에 확대 실시되고 있는 오염총량관리제도는 이러한 필요성이 제도화된 것으로 우리나라 물관리 정책의 매우 큰 변화이다. 이 제도는 특정 수역을 대상으로 대상 수계로 유입되는 오염물질의 총량을 수질환경기준을 만족시킬 수 있는 일정 수준 이하가 되도록 유역 내 모든 오염원을 관리 및 규제하는 방법이다.[1)] 이러한 오염총량관리제는 기존의 규제 중심의 수질관리에서 벗어나 자율적 오염예방과 지역개발 욕구를 충족시키는 정책이나 정착과정에 많은 기초 자료와 체계적인 관리 기법이 요구된다. 또한 지역경제와 환경관리를 최적화해야 하는 지자체와 제도를 시행하는 중앙정부의 효율적인 제도 운영도 반드시 필요하다.

우리나라의 오염총량관리제는 미국에서 1991년부터 시행하고 있는 총량규제제도(TMDL: Total Maximum Daily Load)에서 그 배경을 찾아볼 수 있다. 미국의 총량규제제도는 자연 수체의 자정능력을 보다 효율적으로 활용하기 위한 것으로 유역에 위치한 모든 오염원과 수체가 갖는 자정용량을 정량화한 후 각 배출원에 적절한 허용량을 할당해주는 제도이다. 이 제도는 오염원과 수용 수체의 수질간의 정량적 관계에 근거하고 있으며 이를 가능하게 하는 것이 수질모델이다. 다시 말하면 총량규제는 수질모델의 활용으로 인하여 가능해진 제도라 해도 과언이 아니며, 대상수계에 적합한 수질모델을 선정하고 적용하는 것이 무엇보다 중요하다. 적용모델은 크게 유역모델과 수용수체모델(하천 또는 호수 모델)로 구분되며 유역모델은 수체에 유입되는 오염부하량을 산정하고 수용수체모델은 하천이나 호수에서 나타나는 수질을 예측하기 위한 모델이다.

우리나라 오염총량관리제도 역시 유역모델과 수용수체모델을 이용하여 허용부하량을 산정하는 것이 제도 운용의 핵심 사항이다. 대상 수체에 정해진 기준치를 달성하는데 필요한 유역의 점오염원과 비점오염원에 대한 부하량을 산정해야 하며, 이를 위해서는 수질모델 적용의 일반적인 과

† To whom correspondence should be addressed.
ssp@ewha.ac.kr

정인 보정과 검증, 그리고 예측이라는 단계 외에 한계조건(Critical Condition)에서의 허용부하량(TMDL) 산정이라는 과정이 요구된다.[5]

본 연구는 미국에서 TMDL 산정에 널리 이용되고 있는 의사결정 지원시스템 WARMF(Watershed Analysis Risk Management Framework)을 국내 하천의 총량관리에 적용한 사례이다. 대상 수계는 팔당호의 지천인 경안천이며, 대상 수질은 BOD로 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 연구대상지역

본 연구의 대상지역은 경안천의 발원지로부터 우산천 합류 지점인 광동교에 이르는 구간이며, 유로연장이 약 47.7km, 유역면적은 약 560km$^2$이다(Fig. 1). 경안천은 수도권 상수원인 팔당호에 유입되는 하천 중에서 유역에 오염원이 많고, 수질이 가장 나쁘며, 유하거리가 짧기 때문에 한강 수계에서 가장 중요하게 관리되는 하천이다. 그러나 이러한 중요성에도 불구하고 경안천 유역은 수도권과의 인접성으로 인한 개발 압력으로 오·폐수 배출시설이나 축산시설과 같은 오염원이 현재 계속 증가하고 있다. 따라서 지역개발과 수질관리를 동시에 달성할 수 있는 보다 과학적인 규제가 필요하다.[6]

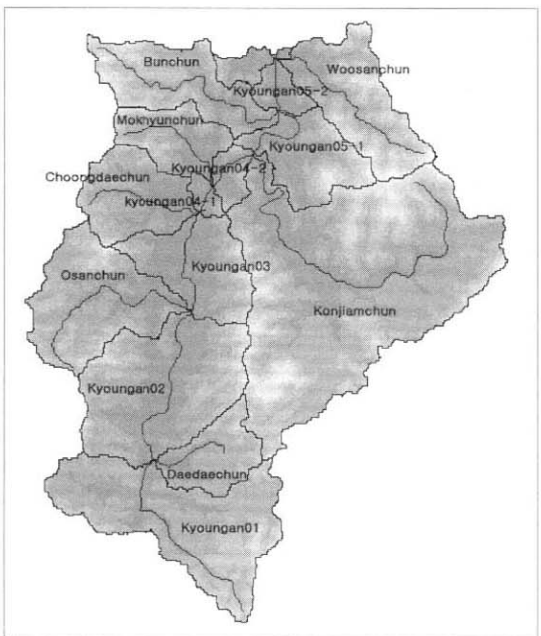


**Fig. 1.** The study area and division of sub-watersheds.

### 2.2. 적용 시스템 개요

본 연구에 사용된 WARMF (Watershed Analysis Risk Management Framework)는 미국 Systech Engineering사에서 TMDL을 위해 개발된 의사결정 지원시스템 (decision support system)으로, 데이터베이스와 모델 시뮬레이션, 그래픽 소프트웨어 등 시스템에 필요한 자료를 윈도우 GUI(Graphical User Interface)로 통합하였다.[7,8] 지금까지 WARMF는 미국 West Virginia 주의 Cheat 강 유역, California 주와 Nevada 주에 걸쳐있는 Truckee 강 유역, North Carolina 주와 South Carolina 주의 Catawba 강 유역, Virginia 주와 Tennessee 주의 Holston 강 유역, Connecticut 주의 Hockanum 강 유역, 대만의 Techi 강 유역 등에 적용되었다.[5,7,9,10]

WARMF는 Fig. 2와 같이 Data, Knowledge, Engineering, TMDL, Consensus 등 5개의 모듈로 구성되어 있으며, 각 모듈은 윈도우 GUI로 연결되어 있어 서로 보완적으로 운용될 수 있다. Engineering 모듈은 수문과 수질 시뮬레이션을 수행하는 것이며, 여기서 필요로 하는 기상, 대기질, 점오염원, 유량 전환 자료 등은 Data 모듈에서 제공된다. 또한 Data 모듈은 관측 유량과 수질 자료를 포함하기 때문에 모델의 보정시 사용할 수 있다. TMDL 모듈은 TMDL 계산을 위한 단계적 과정을 제공하는 의사결정 모듈이며, Engineering 모듈의 과학적 계산과정을 통해 TMDL의 가능한 여러 가지 해를 제시해 준다. Consensus 모듈은 경제적, 사회적, 정치적 요인을 고려하여 가장 합당한 TMDL을 선정하도록 도와주는 기능을 제공해 준다.[5,11] 주요 시뮬레이션은 Engineering과 TMDL 모듈로 수행되며 본 연구에서 주로 사용되었다.

Engineering 모듈은 유역모델과 수용수체모델로 구성되어 있으며 지금까지 개발되어 널리 사용되고 있는 모델로 구성되어 있다. 주된 계산은 ILWAS (Integrated Lake-Watershed Acidification Study) 모델로 이루어진다. 이 모델은 유역을 소유역, 하천 구획, 호수 층으로 나누고, 소유역은 식생층과 토양층으로 세분한다.[12] 소유역은 수문과 수질 시뮬레이션을 위해 네트워크 형태로 연결되어 있다. 또한 여러 호수를 가지고 있는 유역에 적용할 수 있도록 보완되었으며, 소유역 내에 서로 다른 토지이용도 포함할 수 있도록 개선되었다. 침식, 침전, 재부유, 침전물 이동을 위한 알고리즘은 ANSWERS 모델로부터, 지표면의 오염물질 축적은 SWMM(Storm Water Management Model) 모델의 기작을 이용하였다. 혼합-세정 알고리즘(mixing and wash-off algorithm)은 비점오염원 부하 생성과정을 시뮬레이션하

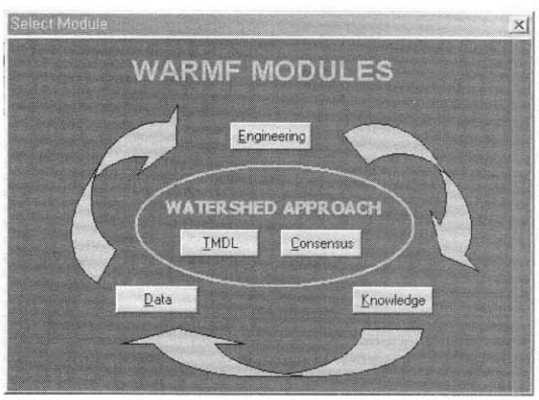


**Fig. 2.** Modular design of WARMF decision support system for watershed management.

는데 사용되었으며, 완충지역의 효과를 평가하는 기능이 첨부되었고 점오염원 배출도 포함되었다. 살충제와 인의 퇴적물 흡·탈착, 영양물질과 조류의 반응은 WASP5의 기작을 이용하였다.[11]

TMDL 모듈은 허용부하량 산정을 위한 과정을 제공해 주는 것으로, Engineering 모듈에서 수행된 실제적인 계산 결과를 나타낸다. 허용부하량(TMDL) 산정을 위해 우선 조건을 지정해 준 후, 시뮬레이션 고유의 이름을 지정해 준다. 지정해 준 조건에 맞추어 시뮬레이션한 후 결과를 보여준다. 그리고 시뮬레이션 결과가 지정한 조건의 해를 구하였는지 판단해 준다. 만약 해를 구했다면, 점오염원과 비점오염원에 할당된 부하량으로 나누어 저장된다. 해를 구하지 못했다면, 사용자가 조건을 조정하여 다시 시뮬레이션할 수 있다.[11]

### 2.3. 유역모델 적용

DEM(Digital Elevation Model) 자료를 이용하여 경안천 유역을 총 14개의 소유역(본류유역 7개, 지류유역 7개)으로 구분하였으며, 소유역 네트워크 모식도로 표현하면 Fig. 3과 같다. 기상자료는 경안천 유역 내 현재 운영되는 기상관측소가 없으므로, 인근의 수원, 양평, 이천 기상관측소 자료 평균값을 이용하였으며, 1996년부터 2000년까지의 강수량, 최고 기온, 최저 기온, 이슬점 온도, 운량, 해면 기압, 풍속 등의 자료를 일별 값으로 입력하였다. 대기질 자료는 환경부 대기오염 자동측정망 자료를 이용하였다. 토지이용 자료는 토지피복 GIS 자료를 이용하였다. 토지이용 분포는, 산지가 64%로 전체 면적 중 가장 높은 비율을 차지하였으며 다음으로 밭(19%), 대지(9%), 논(6%) 등의 순으로 나타났다.[13] 비료 사용량은 용인시와 광주시의 통계연보에 기록된 비료공급량 자료를 이용하였다. 토양 자료는 대상 지역의 정밀토양도를 이용하여 소유역별 지표면 토양입자의 모래(sand), 실트(silt), 점토(clay) 함량을 조사하고, 여기에 적합한 토양침식 인자 K 값을 구한 후 모델에 입력하였다.[14,15]

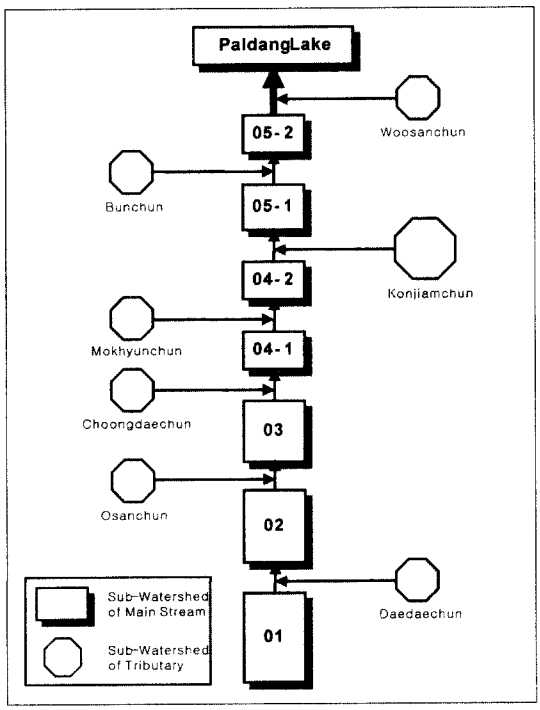


**Fig. 3.** Schematics of the watershed network in the study area.

### 2.4. 하천모델 적용

WARMF의 하천모델은 상하류 고도, 하천길이와 초기 깊이, 조도계수 값을 요구하며, DEM 자료를 이용하여 이 값을 구한다. 경안천 DEM 자료를 통하여 이 값은 입력하였으며, 하상의 조도계수 값과 수심과 하폭의 관계 곡선은 하천정비 기본계획서에서 제시한 재질과 횡단면도를 이용하여 구하였다.[16,17] 점오염원은 생활계, 산업계, 축산계로 나누어 원단위법을 이용하여 산정하였다. 생활계의 경우 하수처리인구를 제외한 미하수 처리인구의 배출부하량을 유역별로 산정하여 입력하였으며, 하수처리장의 경우에는 방류수질과 유량을 곱하여 배출부하량을 해당 방류수역에 입력하였다. 축산계의 경우 발생원단위를 곱하여 산정하였으며, 산업계 배출부하량은 방류량에 배출허용기준농도를 곱하여 산정하였다.[6]

WARMF에서는 각 하천별로 실측 유량 및 수질 자료가 입력되며, 모델 보정시 이 자료를 이용하게 된다. 경안천 유역에 있는 수위관측소는 광주읍 쌍령리 경안 1교에 위치한 경안 수위관측소가 유일하나, 수위자료와 측정성과가 부족하고 유량변동이 없는 기간이 상당히 길기 때문에 그 자료를 이용하여 보정하기에는 어려움이 있었다. 본 연구에서는 수위-유량 관계가 양호한 여주 수위표의 자료를 이용했으며 유역면적 비로 산정한 유량값을 실측 유량값으로 사용하여 보정에 사용하였다. 관측 수질 자료는 환경부 수질측정망 자료인 경안천01 지점부터 경안천06 지점의 실측값을 사용하여 보정에 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 모델 적용

모델 적용 결과를 실측값과 비교하여 타당성을 검토하였다. 환경부의 경안천 수질측정지점에서 1999년에 관측된 BOD와 유량을 모델 결과와 비교하여, Fig. 4에 제시하였다. WARMF는 TOC (Total Organic Carbon)의 값으로 결과가 제시되기 때문에 TOC를 BOD로 환산하였다. 환산할 경우, TOC에 산화반응식에서 탄소의 산소소모량비(O/C = 32/12)를 곱한 값이 $BOD_u$가 된다. 여기에 다시 2/3($BOD_u$ ≒ $1.5BOD_5$)을 곱하여 $BOD_5$로 전환한 후 비교하였다.[18] 모델값과 실측값을 비교하면 비강우시에는 대체로 일정한 농도를 유지하며, 강우량이 많은 7월에서 9월 사이에 농도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 강우시 비점오염원에 의한 영향으로 사료된다. 또한 모델 결과에서 강우에 따라 유량이 증가하고 수질이 변화하는 것이 잘 나타나고 있다. 그러나 실측값이 월 1 회 자료이기 때문에 모델 결과에 나

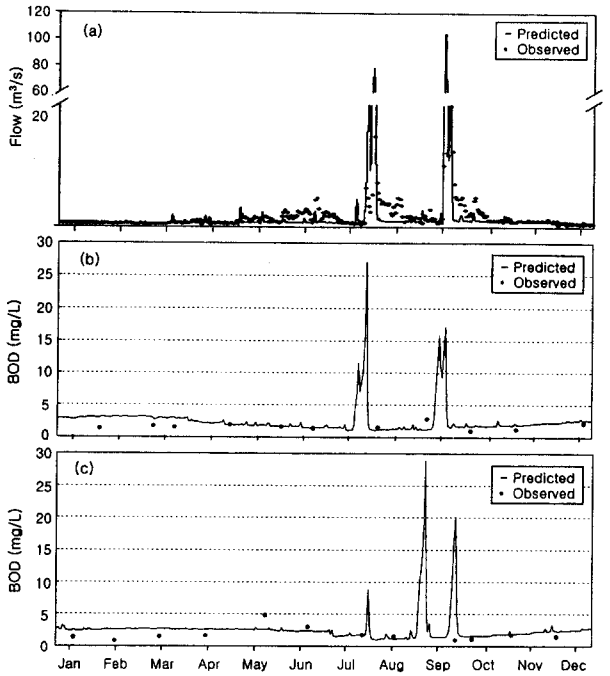


**Fig. 4.** Model Validation Results
(a) Flow(1999) (b) BOD(1999) (c) BOD(2000)

타난 경향이 적절히 비교되지 못한다. 향후 오염총량관리 시행을 위해서는 실측값의 관측횟수를 증가시켜야 하며, 특히 강우가 많은 여름철에는 보다 정밀한 관측이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

### 3.2. 허용 부하량 산정

경안천 유역은 팔당수질보전특별대책지역으로 목표수질은 저수기 기준으로 하천환경기준 Ⅰ등급(용인시 모현면, 광주군 광주읍, 오포면, 초월면, 퇴촌면, 남종면, 중부면, 실촌면)과 Ⅱ등급(용인시 용인읍, 내사면, 포곡면)으로 설정되어 있다. 즉 총량관리의 대상물질인 BOD를 기준으로 경안천 상류의 경우 3mg/L, 중하류의 경우 1mg/L를 목표수질로 하고 있다(환경처 고시 91-35호). 그러나 경안천 유역 중하류에 위치한 광주시의 경우, 현재로서는 목표수질을 만족시키는 것이 현실적으로 불가능하다. 「광주수질오염총량관리제계획(안)」 환경부 고시 1999-143호에 의해 삭감가능량을 기초로 하여 수질 정책의 목표를 크게 저해하지 않으면서 광주군의 지역적인 여건을 반영할 수 있을 정도의 목표수질을 오염총량관리계획에서 제시하였다. 이상적인 삭감가능량에 기초하여 설정된 목표수질인 BOD 3.70mg/L를 총량관리계획을 통해 궁극적으로 달성해야 할 목표수질로 가정하고, 지역 특수성과 삭감방안 등을 지원할 기술, 재원, 법제 정비 등을 고려하여 현실적으로 이행 가능한 삭감량을 고려한 실질적 목표수질을 4.36mg/L로 제시하였다.[19]

본 연구에서는 위의 보고서가 제시한 목표수질에 바탕으로 경안천이 팔당호로 유입되는 유출 지점에서 BOD 목표수질 3.0mg/L, 3.5mg/L, 4.0mg/L를 만족시키기 위한 점오염원 및 비점오염원 삭감량을 WARMF의 TMDL 모듈을 이용하여 산정하였다. 우리나라 오염총량관리제의 경우 저수기를 기준으로 삭감량을 산정하도록 하고 있으나, 이럴 경우 비점오염원에 대한 영향을 고려하기 힘들기 때문에 본 연구에서는 주어진 기간 동안 목표수질 달성 %에 따른 삭감량을 산정하였다.[7] 모델은 1996년부터 2000년까지 5년 동안의 수질을 시뮬레이션하였으며, 팔당호로 유입되기 전 우산천 합류 지점에서 목표수질을 만족시키기 위해 계산된 TMDL은 Table 1과 Fig. 5에 제시하였다.

**Table 1.** Alternative Allocations of Point and Nonpoint BOD Loads

| Water Quality | % | Point Reduction (%) | Point Load (kg/day) | Nonpoint Load (kg/day) | Total (kg/day) |
|---|---|---|---|---|---|
| 3.0mg/L | 80% | 0 | 1,570 | No Solution | |
| | | 10 | 1,410 | 1,580 | 2,990 |
| | | 20 | 1,250 | 5,140 | 6,390 |
| | | 30 | 1,100 | 6,920 | 8,020 |
| | 85% | 0 | 1,570 | No Solution | |
| | | 10 | 1,410 | 729 | 2,139 |
| | | 20 | 1,250 | 3,380 | 4,630 |
| | | 30 | 1,100 | 5,260 | 6,360 |
| | 90% | 0 | 1,570 | No Solution | |
| | | 10 | 1,410 | No Solution | |
| | | 20 | 1,250 | 2,340 | 3,590 |
| | | 30 | 1,100 | 4,120 | 5,220 |
| 3.5mg/L | 85% | 0 | 1,570 | 2,280 | 3,850 |
| | | 10 | 1,410 | 4,590 | 6,000 |
| | | 20 | 1,250 | 6,410 | 7,660 |
| | | 30 | 1,100 | 9,250 | 10,350 |
| | 90% | 0 | 1,570 | 1,150 | 2,720 |
| | | 10 | 1,410 | 3,240 | 4,650 |
| | | 20 | 1,250 | 5,250 | 6,500 |
| | | 30 | 1,100 | 6,790 | 7,890 |
| | 95% | 0 | 1,570 | No Solution | |
| | | 10 | 1,410 | 1,380 | 2,790 |
| | | 20 | 1,250 | 3,700 | 4,950 |
| | | 30 | 1,100 | 3,920 | 5,020 |
| 4.0mg/L | 90% | 0 | 1,570 | 4,080 | 5,650 |
| | | 10 | 1,410 | 6,320 | 7,730 |
| | | 20 | 1,250 | 7,760 | 9,010 |
| | | 30 | 1,100 | 8,550 | 9,650 |
| | 95% | 0 | 1,570 | 2,170 | 3,740 |
| | | 10 | 1,410 | 4,260 | 5,670 |
| | | 20 | 1,250 | 4,490 | 5,740 |
| | | 30 | 1,100 | 4,700 | 5,800 |
| | 100% | 0 | 1,570 | No Solution | |
| | | 10 | 1,410 | No Solution | |
| | | 20 | 1,250 | 635 | 1,885 |
| | | 30 | 1,100 | 664 | 1,764 |

위의 결과에서 점오염원의 삭감이 없을 시에는 목표수질 3.0mg/L를 만족하지 못하며, 점오염원의 삭감 %가 10, 20, 30%로 높아질수록 그에 따른 비점오염원의 허용부하량이 크게 증가되는 것을 살펴볼 수 있다. 이는 비강우시 수질에 영향을 주는 점오염원의 감소로 인해 비강우시의 수질

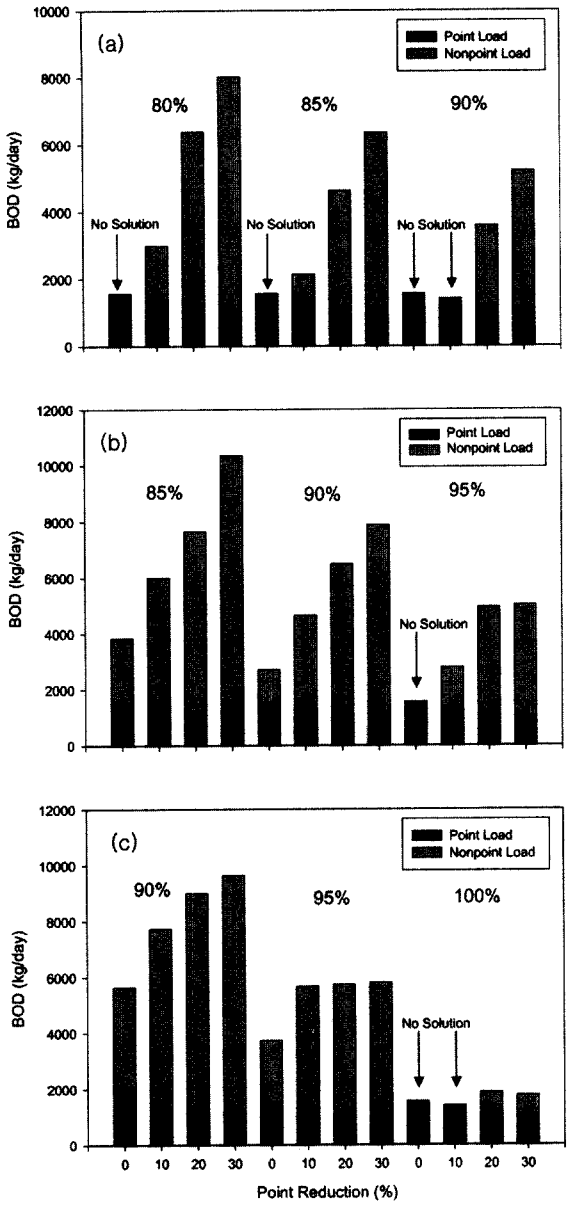


**Fig. 5.** Alternative Allocations of Point and Nonpoint BOD Loads - (a)3.0mg/L, (b)3.5mg/L, (c)4.0mg/L.

이 좋아지며 그에 따라 전체 기간 중 목표수질 달성 %가 증가하게 되어 그만큼 비점오염원의 허용부하량이 증가하게 되는 것으로 사료된다. 그러나 이때 고려해야 할 부분은 목표 연도의 오염총량 산정 시 해당 연도의 삭감목표량은 삭감가능량을 고려하여 설정하되, 오염부하총량이 전년도 오염부하총량을 초과하지 않도록 설정되어야 한다.[19] 목표수질 달성 %가 증가할수록 점오염원은 감소 %도 증가하며, 이는 수질 개선에 점오염원의 부하량이 큰 영향을 미치고 있음을 살펴볼 수 있다.

목표수질이 3.5mg/L일 경우, 목표수질 달성율이 85%나 90%일 경우에는 점오염원 부하량의 적은 감소에도 비점오염원의 허용부하량이 크게 증가하게 되는 것에 비해 목표수질 달성률이 95%일 경우 비점오염원의 허용부하량 증가비율이 크게 감소함을 알 수 있다. 이는 목표수질 달성율을 높이기 위해서 점오염원 부하량의 감소뿐만 아니라 비점오염 부하량 감소도 동시에 이루어져야 하는 것을 의미한다.

목표수질 4.0mg/L를 90% 만족시키기 위해서는 점오염원의 삭감량이 증가할수록 비점오염원의 허용부하량이 증가함을 알 수 있다. 그러나 목표수질을 95% 만족시키는 경우에는 점오염원의 감소율을 10%씩 증가시키더라도 비점오염원의 허용부하량이 증가하지 않아 총허용부하량에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 목표수질의 100% 달성을 위해서는 점오염원이 20% 이상 감소되어야 하며, 다른 경우보다 비점오염원 감소가 더 크게 요구됨을 알 수 있다. 이는 수질향상을 위해서는 점오염원 뿐만 아니라 강우시 발생하는 비점오염원의 관리도 중요함을 나타낸다. 또한 이 경우, 점오염원을 20% 이상 감소시킨 후에 총허용부하량의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 점오염원을 더 이상 삭감한다 하더라도 총허용부하량에 큰 변화가 없다는 것을 의미하며, 경제적으로 적합한 삭감량 산정에 이용될 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구는 오염총량관리제를 위한 의사결정지원시스템인 WARMF를 경안천 유역에 적용하였다. 연구 대상지역인 경안천을 14개 소유역과 14개 하천 구간으로 나눈 후 모델을 적용하고, 유량과 BOD에 대하여 타당성을 검토하였다. 실측값이 월 1 회 관측된 자료이기 때문에 정밀한 경향을 검토하기에 다소 부족하였으나 모델 예측값은 비교적 실측값을 적절히 재현하는 것으로 나타났다.

BOD의 목표수질이 3.0mg/L, 3.5mg/L, 4.0mg/L일 때 팔당호 유입지점에서 목표수질 달성을 위한 삭감량을 점오염원과 비점오염원으로 나누어 산정하였다. 점오염원의 삭감 없이 목표수질 3.0mg/L를 달성할 수 없으며, 점오염원에 대한 삭감 비율이 10, 20, 30%로 높아질수록 비점오염원에 대한 허용부하량이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 목표수질을 3.5mg/L으로 가정하면, 달성율이 85%나 90%일 경우에는 점오염원 부하량의 적은 감소에도 비점오염원의 허용부하량이 크게 증가하게 되는 것에 비해 목표수질 달성률이 95%일 경우 비점오염원의 허용부하량 증가비율이 크게 감소하는 것으로 예측되었다. 이는 목표수질 달성율을 높이기 위해서 점오염원 부하량뿐만 아니라 비점오염 부하량 감소도 동시에 이루어져야 하는 것을 의미한다. 목표수질 4.0mg/L를 90% 만족시키기 위해서는 점오염원의 삭감량이 증가할수록 비점오염원의 허용부하량이 증가하는 것으로 나타났으나, 95% 만족시키는 경우에는 점오염원의 감소율을 10%씩 증가시키더라도 비점오염원의 허용부하량이 증가하지 않아 총허용부하량에는 큰 변화가 없었다. 목표수질 100% 달성을 위해서는 점오염원이 20% 이상 감소되어야 하며, 다른 경우보다 비점오염원 감소가 더 크게 요구됨을 알 수 있었다.

본 연구에서 사용된 WARMF는 오염총량관리제를 시행하는데 매우 유용하게 사용될 수 있었다. 기존에 사용되는

유역모델과 하천수질모델을 적용하는 것보다 시간을 크게 줄일 수 있으며, 모델결과를 연결하는 과정에서 나타나는 오차도 크게 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 우리나라 오염총량관리제 시행에서 사용하는 비점부하량 산정을 위하여 원단위를 사용하는 것을 감안하여 허용부하량에 대한 정확성이 크게 증가할 것이다. 또한, 계절별 강우변화에 따라 시변화 형태로 허용부하량을 산정하기 때문에 활용도가 매우 크다. 우리나라 오염총량관리제의 발전을 위하여 본 연구에서 사용된 WARMF와 같은 시변화 시뮬레이션이 가능한 유역과 하천 모델이 포함된 의사결정지원시스템 개발과 활용이 시급히 요구된다.

## 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업 수자원의 지속적 확보기술개발사업(과제번호 5-4-1)의 일부 지원으로 수행되었습니다. 또한 연구 진행과정에서 WARMF 실행을 지원해준 미국 Systech Engineering사의 Carl Chen과 Joel Herr에게 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. 환경부, 한강수계 오염총량관리제 시행방안 연구 (2000).
2. 나은혜, 박석순, 유역 및 하천 모델의 결합적용을 통한 시기별 오염부하량 산정, *대한환경공학회지*, **23**(9), pp. 1561-1573 (2001).
3. 천승규, 조희찬, 이광수, 하천구간 및 배수구역 특성을 고려한 금강 수계 오염총량관리제 시행방안 연구, *대한환경공학회지*, **23**(5), pp. 767-779 (2001).
4. 박석순, 나유미, 나은혜, 과학 적인 수질관리를 위한 오염총량관리제도의 추진 방안, *환경영향평가*, **10**(2), pp. 157-165 (2001).
5. Chen, C. W., Ziemelis, L., Herr, J., Goldstein, R. A., Impacts of a thermal power plant on thephosphorus TMDL of a reservoir, *Environmental Science & Policy*, S217-S223 (2000).
6. 한강환경관리청, 경안천 유역 오염원 현황 보고서, 한강환경관리청 (1999).
7. Chen, C. W., Herr, J., Ziemelis, L., Watershed Analysis Risk Management Framework: A Decision Support System for Watershed Approach and TMDL Calculation, Electric Power Research Institute (1998).
8. Herr, J., Weinsraub, L., Chen, C. W., User's Guide to WARMF: Documentation of Graphical User Interface, Electric Power Research Institute (2000).
9. Chen, C. W., Herr, J., Goldstein, R. A., Sagona, F. J., Rylant, K. E., Hauser G. E., Watershed Risk Analysis Model For TVA's Holston River Basin, *Water, Air and Soil Pollution*, **90**, pp. 65-70 (1996).
10. Chen, C. W., Herr, J., Ziemelis, L., Girffs, M. C., Olmsted, L. L., Goldstein, R. A., Consensus Module to Guide Watershed Management Decisions for Catawba River Basin, The Environmental profissional, **19**, pp. 75-79 (1997).
11. Chen, C. W., Herr, J., Ziemelis, L., Goldstein, R. A., Decision Support System for Total Maximum Daily Load, *Journal of Environment Engineering*, July, pp. 653-659 (1999).
12. Gherini, S. A., Mok, L., Hudson, R. J. M., Davis, G. F., Chen, C. W., Goldstein, R. A., The ILWAS Model : Formulation and application, *Water Air and Soil Pollution*, **26**, pp. 425-459 (1985).
13. 송동하, 일일 오염 부하량 예측을 위한 분포형 유역모델의 개발, *서울대학교 박사학위 논문* (1999).
14. Ward, A. D., Elliot, W. J., Environmental Hydrology, Lewis Publishers (1995).
15. 전형섭, 김태근, 조기성, 김환기, GIS를 이용한 비점오염의 원인 지역 추출에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **18**(4), pp. 451-463 (1996).
16. 경기도, 경안천수계 하천정비기본계획, 경기도 (2001).
17. 경기도, 곤지암천수계 하천정비기본계획, 경기도 (2001).
18. 구본경, 유역의 토지이용상태가 수질에 미치는 영향에 관한 연구, *서울대학교 석사학위 논문* (1988).
19. 광주시, 광주수질오염총량관리제계획(안) 보고서, 광주시 (2000).