

論 文

팔당호의 영양염류 예측을 위한 수질관리모형의 비교

Comparison of Water Quality Models for Prediction of Nutrients in Lake Paldang

박경철\* 안규홍\* 염익태\*\* · 강선홍\*

Kyung-Chul Park\* · Kyu-Hong Ahn\* · Ick-Tae Yeon\*\* · Seon-Hong Kang\*

Abstract

In this study two water quality models, widely used in Korea, WASP5 and SWRRB were applied to Lake Paldang. The simulated results were compared with the measured data. The simulation results using WASP5 showed that this model could reasonably predict the concentrations of NO3-N, Organic N, and Organic P. In order to investigate the effect of pollution by non-point source SWRRB was simulated and the concentrations of nutrients were predicted. The results from WASP5 and SWRRB are not directly comparable because their input data are different and output values are differently presented. Therefore, if these two simulation models were applied simultaneously, many valuable data and information could be obtained due to their own applicabilities and advantages.

1. 서 론

우리 나라를 비롯하여 전 세계적으로 비료의 과다한 사용, 오·폐수 및 축산 폐기물의 부적절한 처리 등으로 인하여 하천이나 호수에서 매년 부영양화에 의한 녹조현상이 되풀이되고 있어 그 원인물질로서의 질소와 인의 조절이 시급한 실정이다.<sup>1-3)</sup> 질소의 경우 자생적으로 자연계에서 다량 존재하고 유입경로도 다양하여<sup>4-5)</sup> 축산폐수나 하수처리장 등에서 호소로

유입되는 경우 이외에도 자연적으로 호소내로 축적되기도 한다(Dry deposition). 인 또한 지속적으로 증가하는 축산 폐수 및 비료 사용 등으로 의하여 그 오염 부하량이 매년 증가하고 있다. 특히 이러한 영양염류들은 점오염원에 의한 부하량으로 작용하기도 하면서 동시에 하절기 홍수 등에 의해 토양이 유실 및 침식되면서 대량으로 하천이나 호소로 유입되기도 하는 비점오염원의 특성을 갖기도 한다.<sup>6-7)</sup>

현재 우리 나라의 많은 호수 및 하천에서 영양염류의 과다로 인해 수질이 현격히 악화되고 있고 이를 개선하기 위하여 많은 노력이 경주되고 있으나<sup>4)</sup> 그보다 우선 해결되어야 할 과제는 호소나 하천 등의 수계로 유입되는 영양

\* 광운대학교

\*\* 한국과학기술연구원

염류의 순환 체계를 보다 정확하게 파악하는 일이라고 판단된다. 정량적으로 계산된 영양염류들의 농도 또는 총량에 맞추어 이에 적합한 오염물질의 제어방안 내지는 관리 방안이 도출되어야 할 것이다. 이를 위해서는 우선 기존에 호소나 하천의 수질관리예측에 사용되고 있는 제 모델들을 검토하여 각 모델들의 장·단점을 비교하고 이들의 적용 대상이나 조건 및 적용시의 한계점이나 문제점들을 파악한 후 이를 우리 나라의 수리·수문이나 기후 등의 제반 환경조건들을 고려하여 대상으로 하는 호소나 하천 수계에 가장 적합한 영양염류의 순환모델을 도출하는 과정이 필요하다.

호소수질모형은 호소시스템내에서 발생하는 현상을 요약, 발전시킨 것으로 이의 목적은 호소시스템내의 수질변화를 예측하는 것이다. 수질모형은 일반적으로 비점오염원과 점오염원의 위치 및 수량 변화에 따른 수질의 변화를 예측하는데 적용된다. 호소오염 현상이 다양화됨에 따라 용존 산소 외에 암모니아, 병원성미생물, 부영양화 그리고 수중생물의 역할 등의 포함이 필요하게 되었으며, 이러한 다인자를 포함하는 호소생태계 모형인 WASP, SWRRB 등이 개발되었다.

현재 국내에서 사용되고 있는 모형은 주로 외국에서 개발된 것으로 정체시간이 길고 유량과 수질의 변이가 비교적 적은 호소에 적합한 모형이다. 그러나 국내의 호소는 대부분이 정체시간이 짧고 계절에 따른 강우량의 변화가 크고 오염물질이 불규칙적으로 유입되어 유량과 수질의 변이가 큰 특성을 가지고 있어 이러한 모형에 적용시 수질특성이 제대로 고려되지 않는 경우가 많다. 이러한 이유로 본 연구에서는 국내에서 많이 사용하고 있는 WASP5와 SWRRB의 2가지 모형을 서로 비교·분석하고 실측치와의 비교를 통하여 국내 호소에의 적용성을 평가하고자 하였다. 적용 대상으로는 서울지역의 상수원으로 이용되고 있는 팔당호를 선정하였다.

## 2. 연구의 배경

전국 호소 주변의 여러 오염물질에 의해 호소

의 부영양화 현상이 갈수록 심각해 지고 있다. 호소주변의 논, 밭 등에서 사용되는 질소 및 인산비료에 의한 영양염의 과다 유입과 축산단지에서 발생하는 가축의 분뇨 등에 의해 호소는 부영양화 현상이 가속화되고 있으며 수자원으로서의 사용이 점차 어려워지고 있다. 이렇게 영양염류로 오염되는 호소의 수질을 예측하기 위해서 많은 모델들이 개발되었다. 이러한 전산모형들 중 어떠한 것을 사용할 것인가는 모형의 사용 목적, 관측자료의 가용성, 모형의 신뢰성, 사용자의 선호도 등에 따라 좌우될 것이나, 기본적으로 쉽게 구할 수 있고, 모형의 사용법을 숙지할 수 있는 지침서 등이 있으며, 과거 다른 사용자들의 적용례 등 참고할 만한 문헌자료가 있는 모형이어야 할 것이고 입력자료의 확보 가능성, 국내 현실에 적용 등 여러 제약조건을 생각하면서 정확도와 신뢰도를 만족시키는 것은 쉬운 일이 아니다. 이러한 관점에서 상업용 소프트웨어나 개인용 컴퓨터에서 사용할 수 없는 모형들은 논외로 하고, 수질모형으로서 현재 가장 널리 사용되고 있는 모형인 WASP5, SWRRB 모형을 적용하였다.

WASP5는 이미 국내에서 여러 곳에 적용이 되었고 또한 여러 영양염류 인자들을 예측할 수 있는 모델이고 3차원 동적 모델로서 호소 수질을 예측하는데 적합한 모델이다. SWRRB는 비오염원 오염물질의 거동과 기상, 영양염류의 거동을 예측하는 모델로서 비점오염원 문제가 대두되면서 이 모델의 중요성이 부각되었다.<sup>8)</sup> 두 모델은 EPA에서 무상으로 쉽게 구할 수 있고 영양염류의 간접적인 비교가 가능하므로 두 모델을 연구모델로 선택하였다.

WASP5 모형은 수질항목의 공간적, 시간적 변화를 모의하는 동적 모델로서 입력자료가 방대하고, 수질, 수량, 기상 등의 자료가 상당 기간동안 연속 측정되어야 하며 입력자료는 형식에 맞추어 기존의 입력자료를 수정하여 만든다. 입력자료는 크게 10단계로 구분하고 반응 상수들의 공간적인 변화와 시간적인 변화를 고려하기 위하여 환경변수와 반응상수를 사용한다.<sup>9)</sup>

SWRRB 모형의 입력자료는 크게 기상, 수문

학, 토양, 살충제, 경작물, 호소수질, 저질토 등에 관한 자료가 상당 기간동안 연속 측정되어야 하며 입력자료는 형식에 맞추어 각 부분에 맞게 입력된다.<sup>10)</sup>

### 3. 대상지역의 특성

#### 3.1 팔당호의 유역환경

팔당호의 만수면적은 36.5km<sup>2</sup>로서 소양강, 충주, 대청의 삼개 다목적댐 및 화천댐 다음가는 크기이며, 저수용량은 244×106m<sup>2</sup>에 달하고 평균수심은 6.7m 정도로서 호소는 넓고 반면에 수심은 얇다. 그리고 호소의 길이는 약 73km에 달하며 호소의 평균 폭은 500m로 그 형태는 가늘고 길며, 하류부인 양수리에서 경안천 하구까지가 비교적 폭이 넓어 호폭이 약 1km에 달하며, 호는 남·북한강과 경안천의 3대 하천하류에 이루어진다. 호소는 가늘고 길며 굴곡이 있는 데다 양쪽은 높은 산으로 둘러싸여 있으며 호의 총유역면적은 23,608km<sup>2</sup>로 넓고 또한 연평균강우량도 1,240mm로 비교적 많은 편이어서 이에 따른 호의 연간 총하천유입량도 16,674×106m<sup>3</sup>에 달하고 있다. 경안천계는 유량에 비해 유역면적이 넓고 체류시간이 길어 유속이 매우 느리다. 경안천 상류지역에는 대단위 축산단지가 위치해있고 인구도 집중

되어 있어 여기에서 발생된 각종 오염물질들이 팔당수계로 유입되면서 부영양화 문제를 발생시킨다. 경안천은 유량이 적기 때문에 청평댐의 방류시에 역류하는 현상을 보이므로 경안천의 흐름방향과 유속은 청평댐의 방류량에 상당히 영향을 받게 된다.<sup>11)</sup>

#### 3.2 팔당호의 수질현황

팔당호의 수질현황은 환경부에서 인터넷에 공개한 자료를 이용하였다. 수질측정지점은 경기 남양주시 조안면 삼봉리, 경기 양평군 양서면 양수리, 경기 양평군 남종면 분원리, 경기 남양주시 조안면 능내리댐앞, 경기 양평군 양서면 신원리, 경기 광주군 퇴촌면 광동리이고 1998년 수온, pH, DO, SS, T-N, T-P, Chl-a, BOD, COD등의 월별자료를 이용하였다.

### 4. 수질모형의 실제 적용 및 결과

#### 4.1 수질모형의 적용

##### 4.1.1 팔당호의 모형화

팔당호를 WASP5를 이용하여 모형화하는데 있어서 수질조사지점의 위치가 가장 큰 기준이 되었다. 공공기관에서 매달 조사, 공개하는 북한강수계 경기도 남양주시 조안면 삼봉리, 남한강 수계, 경기도 양평군 양서면 신원리(월계

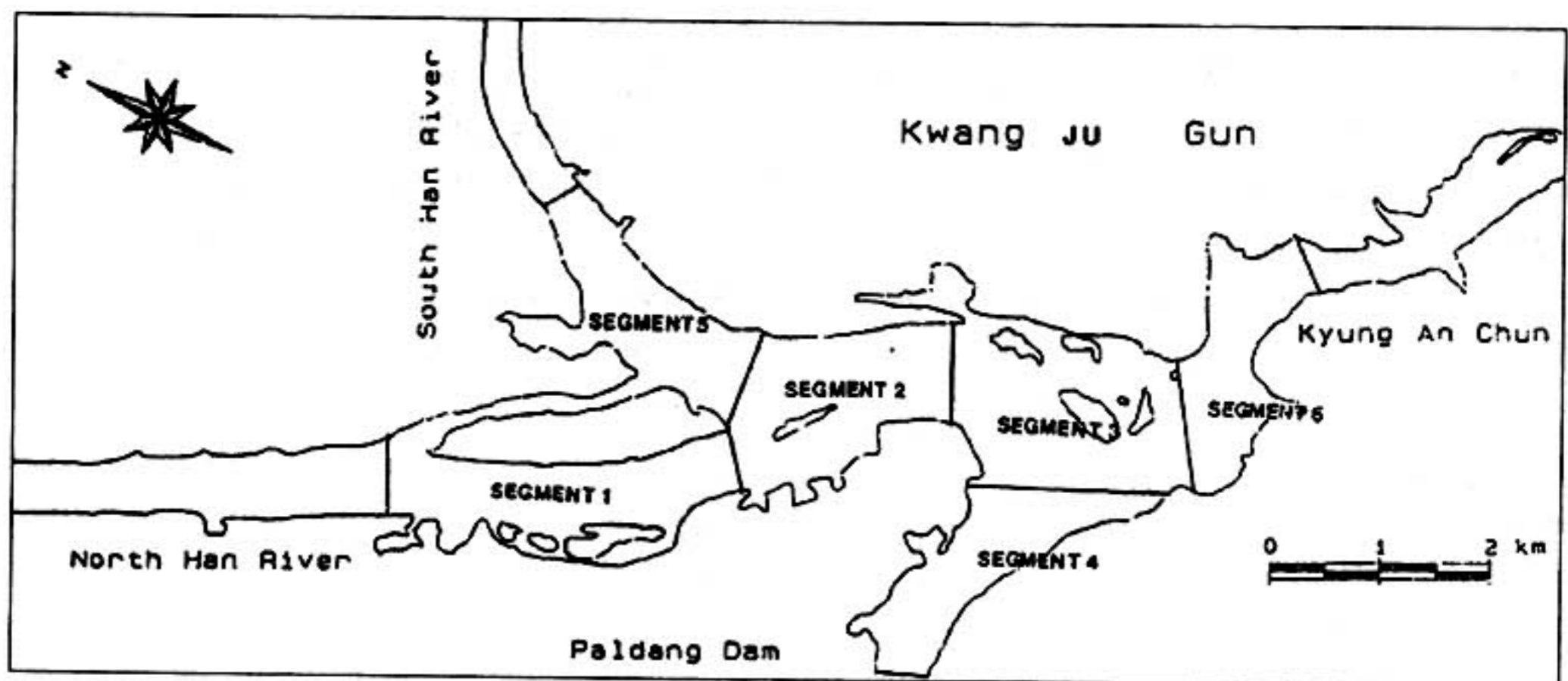


Fig. 1. WASP5에 이용된 팔당호의 6개의 Segments

사앞), 경안천수계 경기도 광주군 퇴촌면 광동리를 모형화의 경계로 호소내 수질측정지점을 기준으로 아래 그림 1과 같이 6개의 구간으로 나누었다. 모형화에 필요한 수리적자료는 환경연구원 보고서<sup>11)</sup> 등에 나타난 값을 기초로 하여 이용하였다.

WASP5와는 달리 SWRRB는 유역면적의 한계가 있기 때문에 수리적자료와 유량을 알 수 있는 상수원보호구역 전체를 1개의 구간으로 모형화를 하였다.

#### 4.1.2 팔당호의 입력자료

WASP5를 모델링하기 위해서 1998년의 팔당호의 구간별 면적, 길이, 체적, 월별 유량<sup>12)</sup>, 별 항목(BOD, DO, Chl-a, Org. P, Org. N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>3</sub>-N)별 수질측정도, 반응계수 자료를 입력하였다. 그러나 유기 인의 경우 국내호소수질 측정항목에 없는 관계로

1989년 국립환경연구원에서 조사한 결과를 이용해서 자료를 입력하였다.

SWRRB를 모델링하기 위해서는 1998년 기준의 기상, 수문학, 토양, 살충제, 경작물, 호소 수질, 저질토등에 관한 자료가 입력되었는데 기상자료는 우리 나라와 위도, 기상환경 등이 비슷한 미국의 오클라호마 기상자료를 바탕으로 하여 우리 나라의 월최고기온, 월최저기온, 강수량을 입력하였고<sup>13)</sup> 저질토 관련 자료는 1998년 9월의 자료를 이용하였다.<sup>14)</sup> 지하수의 유동과 살충제에 관한 입력은 없다는 가정하에 모델을 실시하였다.

#### 4.2 수질모형의 적용결과 및 고찰

##### 4.2.1 모형의 계산결과

NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, Org. N, Org. P에 대하여 WASP5 모형을 적용한 계산치와 실측치를 비교한 결과 중 예로써 Segment 6만의 자료들

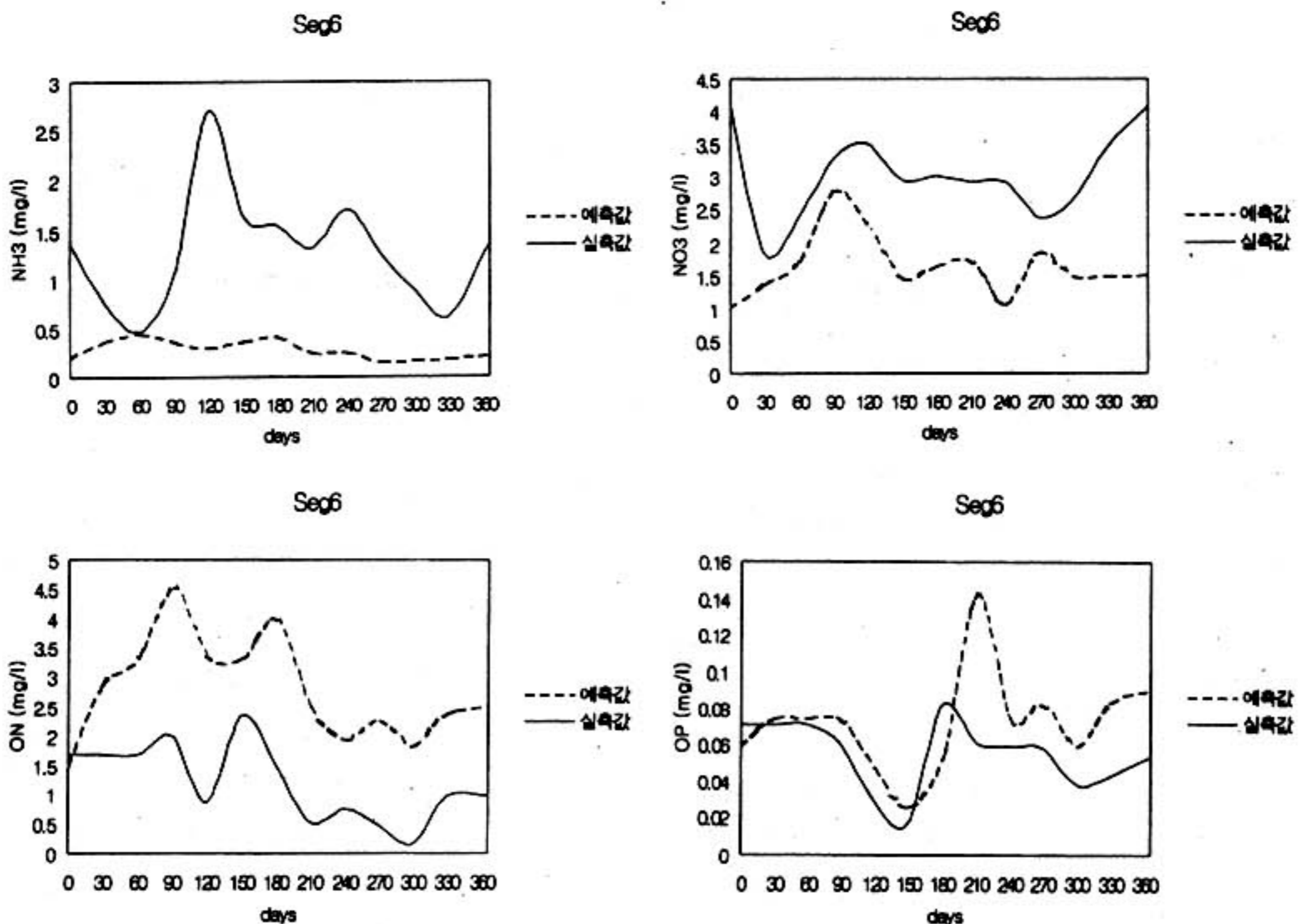


Fig. 2. WASP5 실행 결과

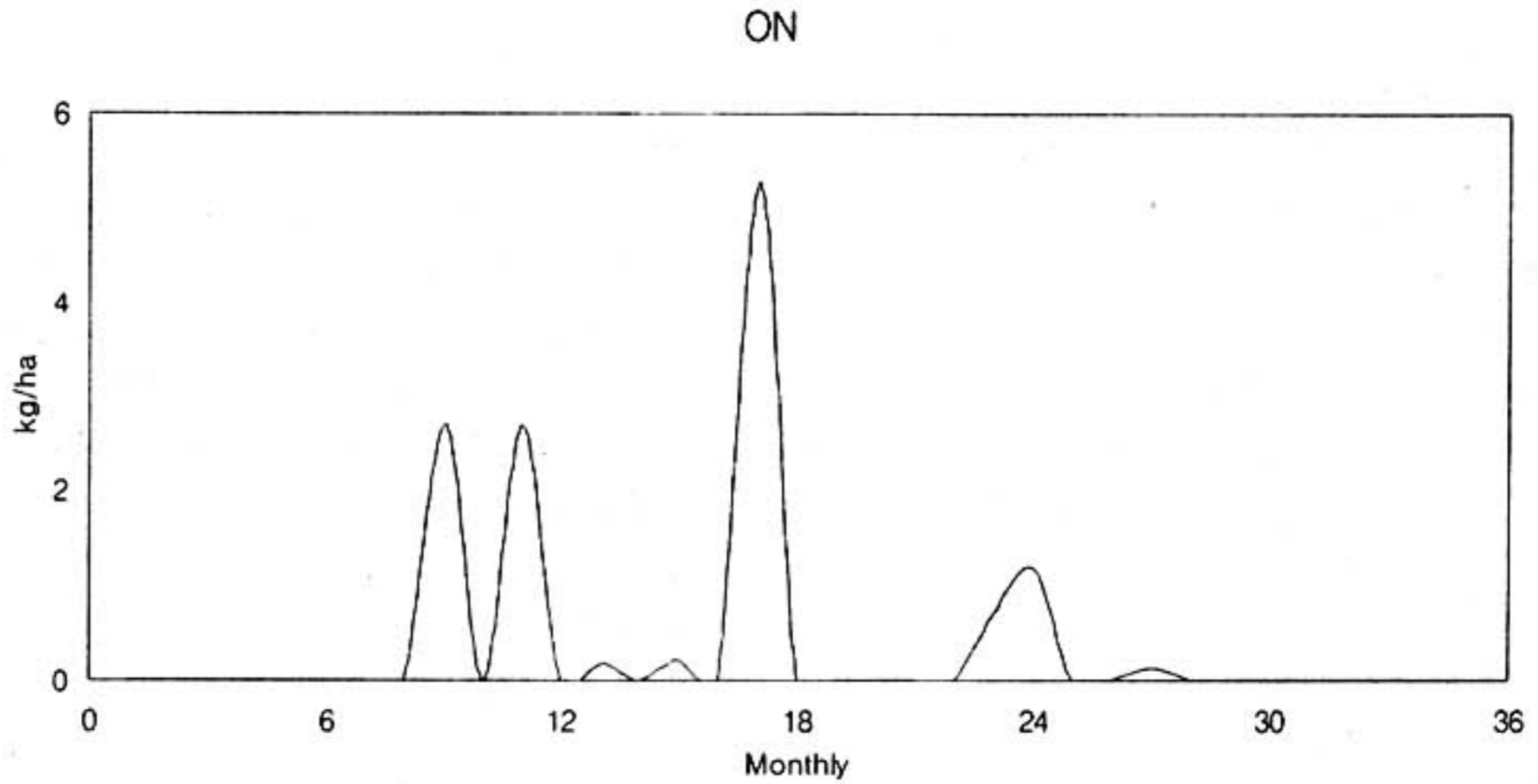


Fig. 3. SWRRB 실행 결과 (Org. N)

을 그림 2에 나타나 있다.

계산치와 실측치를 비교한 결과를 보면  $\text{NO}_3\text{-N}$ , Organic N, Organic P 등의 수질항목에 대한 변화추세는 모델과 실측치가 비교적 잘 일치하고 암모니아성 질소의 농도는 잘 일치하지 않음을 알 수 있다. 그리고 구간별로 심한 차이를 나타내었으며 또한 예측된 수질농도의 범위를 보면 연간 변화폭이 크게 나타났다.

팔당호 주변의 비점오염원들로부터의 오염부하량을 계산하기 위하여 SWRRB를 실행하였고 그 결과로부터 1999년부터 2001년까지의 강우량, 표면 유출량, 증발산량, 유기 질소, 유기인, 표면유출수중의  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도를 예측하여 아래 그림 3 그림 5에 나타 내었다.

그림 3~5까지의 결과를 보면 SWRRB를 실행한 결과값들은 비점오염원에 의한 팔당호내의 오염부하를 나타내는 값들로서 단위가 주로 [kg/ha]로 표시되어 있어 실제 측정농도인 [mg/L] 또는 [mg/kg]과는 직접적인 비교는 불가능하였다.

1998년도의 입력자료를 이용하여 SWRRB를 실행시켜 예측된 유역내의 1999년부터 2001년까지의 3년 동안의 평균 결과값들은 다음의 표 1과 같다.

표 1. SWRRB로부터 예측된 유역내의

OP

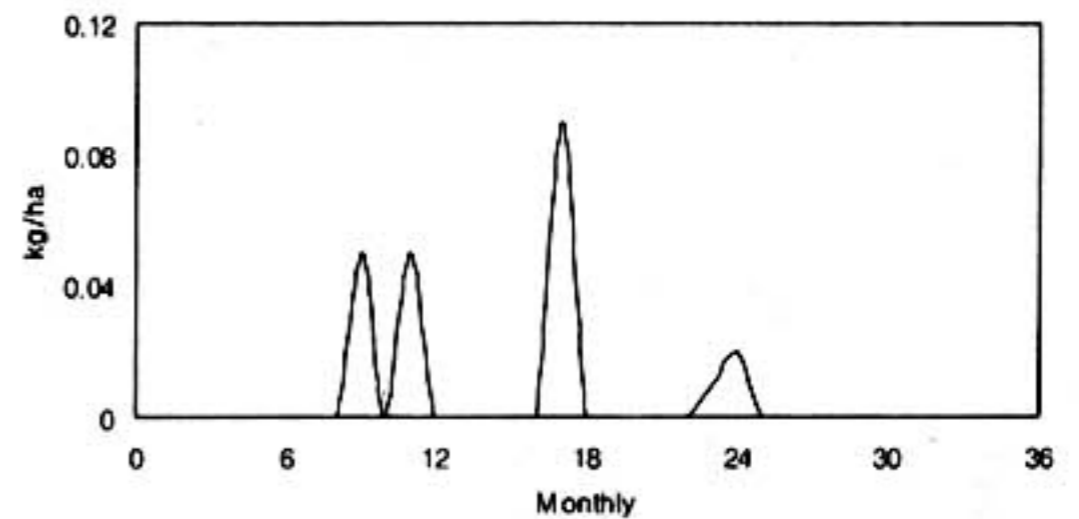


Fig. 4. SWRRB 실행 결과 (Org. P)

$\text{NO}_3$  (SURQ)

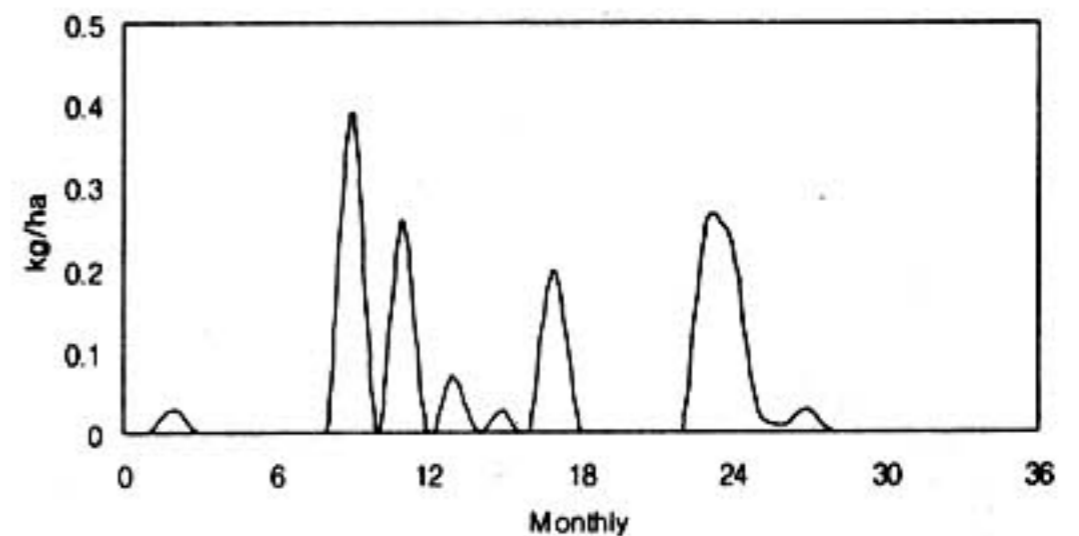


Fig. 5. SWRRB 실행 결과 (표면유출수중의  $\text{NO}_3\text{-N}$ )

1999년부터 2001년까지의 3년 동안 평균 결과 값

표 1. SWRRB로부터 예측된 유역내의 1999년부터 2001년까지의 3년 동안 평균 결과값

인자	값	인자	값
강우량(mm)	700.6	유기질소(kg/ha)	4.368
강설량(mm)	78.48	유기인(kg/ha)	0.076
녹는 눈의 양(mm)	63.01	표면 유출수 중의 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N(kg/ha)	0.510
예측된 표면유출량(mm)	58.03	지하 유출수 중의 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N(kg/ha)	0.228
증발산량(mm)	265.7	용존성 인(kg/ha)	0.006
침식토양량(mm)	33.28	침출된 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N(kg/ha)	6.139

## 5. 결 론

1. WASP5 모형을 팔당호에 적용한 결과, NO<sub>3</sub>-N, Organic N, Organic P 등의 수질항목에 대한 변화추세는 모델과 실측치가 비교적 잘 일치하였으나 구간별로 심한 차이를 나타내었으며 또한 예측된 수질농도의 범위를 보면 연간 변화 폭이 크게 나타났다.

2. WASP5 모형의 적용결과 전반적으로 양호한 예측결과를 나타내어 본 모형을 이용한 팔당호의 영양염류 수질예측결과는 수질관리대책의 수립 등에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

3. 팔당호 주변의 비점오염원들로부터의 오염부하량을 계산하기 위하여 SWRRB를 실행하였고 그 결과로부터 1999년부터 2001년까지의 강우량, 표면 유출량, 증발산량, 유기 질소, 유기 인, 표면유출수중의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 농도를 예측하였다. 강우량, 표면유출량, 증발산량, 영양염류 등을 모델링하는 과정에서 미국의 경우 유역에 대한 정보가 구축되어있어 유역의 변화에 따른 오염도의 변화양상을 판단할 수 있는 것과는 달리 우리나라의 경우 데이터베이스의 부족으로 오염도에 대한 정확한 모델링과 비교 분석이 되지 않으므로 상세한 데이터 베이스

구축이 필요하다.

4. WASP5와 SWRRB 두 모델을 단순 비교하는 데는 입력자료의 차이나 결과값들의 단위가 다른 등의 비교상의 문제점이 있기 때문에 두 모델을 단순 비교하기보다는 두 모델들의 장점을 취하면서 서로 보완적으로 사용함으로써 두 모델들의 결과를 유기적으로 이용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

## 참고문헌

1. 최 영길 외 공역: 담수의 부영양화, 신판문화사, 1995.
2. G.D. Cooke, E.B. Welch, S.A. Peterson, and P.R. Newroth: Lake and Reservoir Restoration, Butterworth Publishers, 1986.
3. P.A. Krenkel and V. Novotny: Water Quality Management, Academic Press, 1980.
4. 강 선홍, 김 경태: "호소내의 인 제거에 관한 연구", 대한상하수도학회지, 제12권 제2호, pp. 59-66, 1998.
5. 강 선홍, 이 정엽: "저질토로부터의 인의 용출거동 예측 및 제어기술 개발-I. 저질토로부터의 인의 용출거동 예측, 제13권 제2호, pp.89-94, 1999.
6. 강 선홍 외: 댐유역 오염물질 유입특성 및 영향에 관한 연구(1차년도), 한국수자원공사, 1996.
- 7) 강 선홍 외: 댐유역 오염물질 유입특성 및 영향

- 에 관한 연구(2차년도), 한국수자원공사, 1997.
- 8) Ralph A. Wurbs: Water Management Models: A guide to Software, pp.118-119, 144, Prentice Hall PTR, 1995.
- 9) Robert B. Ambrose, Jr. , P. E. Tim, and A. Wool: The Water Quality Analysis Simulation Program, WASP5.
- 10) U.S. EPA: SWRRBWQ Windows Interface User's Guide, 1993.
- 11) 국립환경연구원: 팔당상수원 보호 종합대책에 관한 연구, pp.355-358, 1989.
- 12) 한국전력: 팔당댐 방류량 (1997-1999), 1999.
- 13) Martin Wanielista, Robert Kersten, and Ron Eaglins: Hydrology: Water Quality and Quality Control, pp. 97-103, John Wiley & Sons.Inc.
- 14) 한국과학기술연구원: 환경복원 및 재생기술: 핵심 공통 요소 기술개발, pp.468-482, 1999.