

대청댐 유역관리를 위한 수정-WASP5 모형의 적용

김진호 · 신동석* · 권순국**

농촌진흥청 농업과학기술원 환경생태과

*국립환경과학원 수질총량과

**서울대학교 조경지역시스템공학부

Application of Modified-WASP5 for Daecheong Dam Watershed Management

Jinho Kim · Dongsuk Shin* · Sunkuk Kwon**

Div. of Enviro. & Eco., Nat'l Inst. of Agri. Sci. & Tech., Rural Development Administration

**Water Pollution Cap System Division, National Institute of Environment Research*

***Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University*

(Received 4 January 2007, Accepted 11 June 2007)

Abstract

The objective of this study was to develop and apply a water quality simulation model for the evaluation of ungauged watershed. The Modified WASP5 consisted of three sub-models, LOAD-M, DYN-M, and EUT-M. LOAD-M, an empirical model, estimates runoff loadings using point and non-point source data of villages. Daecheong Dam watershed was selected for the research to calibrate, verify and application of Modified-WASP5. LOAD-M model was established using field data collected from all items of water quality and water quantity gaging stations of the watersheds, and was applied to the ungauged watersheds, taking the watershed properties under consideration. The result of water quality simulation using Modified-WASP5 shows that the observed BOD data of Yongpo and Daecheong Dam in 1999 were 0.8 mg/L and 1.0 mg/L, and simulated data were 0.9 mg/L and 0.9 mg/L, respectively. In case of 1999, average BOD concentrations were 0.8 mg/L and 1.0 mg/L. Simulated concentration showed 1.1 mg/L and 1.5 mg/L, respectively. Generally, the simulation results were in good agreement with the observed data. This study was focused on formulating an integrated model for evaluating ungauged watersheds. Even though simulation results varied slightly due to limited availability of data, the model developed in this study would be a useful tool for the assessment and management of ungauged watersheds.

keywords : Modelling, Modified-WASP5, Pollutant load, Watershed management

1. 서론

과거 우리나라의 수질환경정책은 유역의 수계로 유입되는 하폐수의 발생원을 배출허용기준이나 방류수 수질기준을 통해 규제하는 농도규제중심의 정책이었다. 그러나 이러한 기준을 만족하더라도 유역내 오염물질이 일정한계를 초과할 경우, 수환경은 그러한 부하를 견뎌내지 못하고 있기 때문에 최근 이러한 농도규제방식에서 유역내 모든 오염원을 관리할 수 있는 오염총량관리제도가 도입되게 되었다. 이러한 오염총량관리제도의 정책적 수행을 위해서는 우리나라 유역단위 수질관리를 위한 기초연구가 시급이 필요한 실정이다.

유역단위 수질관리를 위한 연구는 크게 오염원 해석, 배출 및 유달 구조 해석, 수질항목간의 상호작용 해석 등으로 구분할 수 있는데(환경부, 1998b), 오염원 해석에 대한 연구는 각 오염원의 발생 원단위 해석을 대상으로 하고 있

으며(최지용 등, 1995), 배출 및 유달 구조 해석에 대한 연구는 오염원으로부터 발생된 오염물질이 하천이나 호수로 이동하는 과정을 대상으로 하며, 수문유출해석 연구의 응용 분야(Beasley et al., 1980)로서 진행되어 왔다. 또한 수질항목간의 상호작용 연구는 1920년대 Streeter and Phelps의 BOD-DO 관계 정립 이후, 1970년대에 지표수 중의 독성물질 거동을 수치해석 방법인 수질모형을 통해 모의하면서 시작되었으며, 오염물질이 수체에 유입된 후 이류 및 확산에 관한 분야를 포함하여 오염물질 및 생태계간의 반응 기작을 대상으로 진행되어 왔다(공동수, 1992).

WASP 계열모형에 대한 적용사례는 WASP4를 이용한 팔당호 수질모의(김원만, 1990; 조홍연 등, 1993; 황인성, 1991)와 최종오(1995)의 WASP4를 이용한 낙동강의 내생산 BOD 평가 등이 있고, Park(1993)은 1-D 모형인 WASP5를 2-D 모형으로 수정하여 Rappahanock Estuary에 적용하였고, Depinto 등(1994)과 Chen 등(1995)은 WASP4의 부모형인 EUTRO4와 Arc/Info를 연결하여 호수수질평가에 적용한 바 있다. Benamen 등(1996)은 Houston시의 비점오염원

* To whom correspondence should be addressed.
sds1965@me.go.kr

평가에서 WASP5를 GIS에 연결하여 BOD와 DO의 농도를 정상상태로 모의하였으며, Karina(1996)은 습지의 수질을 모의함에 있어서 식생으로 인한 인의 순환관계를 계산하는 부모형인 ECOLI를 WASP5모형에 접목한 WASP5E를 개발하였다. Warwick 등(1997)은 네바다주의 Carson강의 비점원오염에 따른 수질특성을 연구하는 과정에서 부착조류의 성장소멸이 TP의 농도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 WASP5의 Chl-a 계산과정을 일부 수정한 바 있다. Simachaya(1999)는 WASP5 모형을 GIS에 연결하여 비점원오염이 수질에 미치는 영향을 연평균 유량에 대하여 평가하였다.

그런데, 국내에 적용된 모형의 대부분이 외국에서 개발되어 국내 실정이나 연구목적에 적합하지 않은 부분이 많으므로, 몇몇 연구자는 해당모형을 수정적용하였는데, WASP5의 FEM 해석(김준현 등, 1995)과 구획별 반응계수 도입(신동석과 권순국, 1999) 등이 있다. 그러나, 현재까지 하천이나, 호수에 대한 수질모형의 국내 적용사례는 하나의 유역 전체를 대상으로 하지 않고 유역 일부나 소구간에 대하여 개별적으로 적용한 것이 대부분이고, 실측농도 자료를 경계조건으로 입력하여 모의하는데 치중하여 왔고, 수질 및 유량 측정자료가 없는 미계측 유역에 대한 연구사례는 찾아보기 어렵다(환경부, 1999c).

따라서, 본 연구에서는 환경부의 오염총량관리 기준 원단위(환경부, 1999b)를 사용하여 오염원 해석을 수행함으로써 오염부하량 산정의 객관성을 유지하고, 건설부 및 환경부 유량·수질 측정망 자료로부터 회귀하여 설정한 유달함수를 측정지점 상류유역에 확대 적용함으로써 미계측 유역의 배출 및 유달 구조 해석의 어려움을 해결하고자 한다. 또한 계산 구획별 반응계수의 도입, 국내에서 실측하고 있는 수질항목으로의 입·출력 수정, 그리고 배열의 크기 확장을 통하여 하천구간의 예측이 가능하도록 기존 WASP5 모형을 수정한 Modified-WASP5를 개발하고, 이 모형을 실측 자료로부터 구한 유달함수와 연결함으로써 대규모 유역관리에 사용할 수 있도록 하나의 시스템으로 통합하여 실용성을 높이며, 대청담 유역에 적용하여 개발모형의 적합성을 검토하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 수정 WASP-5모형의 기본이론

2.1.1. 모형의 기본방정식

유역단위 수질관리를 위해 개발한 수질모형인 Modified WASP5는 오염원 해석, 배출 및 유달 구조 해석, 수질항목간의 상호작용 해석으로 구성되어 있으며, 각각에 해당하는 부모형으로는 미계측 유역의 배출 및 유달부하량을 계산하는 부하모형(LOAD-M), 하천 및 호수의 계산구획 유량, 유속을 계산하는 수리모형(DYN-M), 수질을 계산하는 수질모형(EUT-M)이 있다.

2.1.2. 부하모형(LOAD-M) 개발

부하모형은 오염원현황자료와 배출원단위를 이용하여 배출부하량을 계산한 다음, 계산된 배출부하량과 수질관측지점의 유달부하량으로 실측유달율을 구한다. 유역의 유달율을 유량과 면적과 회귀시켜 유달함수를 구하고, 유달함수를 유역전체로 확대 적용시킨 것이다. 유달부하량의 계산은 배출부하량에 유달함수를 곱한다.

$$L_d = \text{SOURCE} * \text{DUNIT} \quad (1)$$

$$L_a = 86.4 * Q * C \quad (2)$$

$$R = \frac{L_a}{L_d} \quad (3)$$

$$R = f(A, Q) \text{ 이며 즉, } R = \alpha A^{-\beta} Q^{\gamma} \quad (4)$$

$$L_a = L_d * R = L_d * \alpha A^{-\beta} Q^{\gamma} \quad (5)$$

여기서, L_d 는 배출부하량(kg/d), SOURCE는 오염원크기, DUNIT는 배출원단위, L_a 는 실측유달부하량(kg/d), 86.4는 환산계수, Q는 유량(m^3/s), C는 수질농도(mg/L), R은 실측유달율, A는 유역면적(km^2), α, β, γ 는 회귀계수 L_a 는 유달부하량(kg/d)을 의미한다.

2.1.3. 수리(DYN-M) 및 수질(EUT-M)모형 개발

수리모형(DYN-M)은 연속방정식과 모멘텀방정식을 연립하여 유량과 수위를 구하며, WASP5의 부모형인 DYN-HYD5 모형의 기본식과 해법을 그대로 적용하였으며, 수정·개발모형인 DYN-M에서는 DYNHYD5를 대규모 유역관리에 사용할 수 있도록 배열의 크기를 확장하고, 보정 및 결과의 표현을 자유롭게 할 수 있도록 입·출력을 수정하였다. 수질모형(EUT-M)은 수체 내에 들어 있는 물질의 시간적, 공간적 변화를 물질수지 방정식으로 계산하며, WASP5의 부모형인 EUTRO5 모형의 기본식을 그대로 준용하였다.

2.2. 대상유역 및 자료

2.2.1. 대상유역

대청호는 대전, 청주, 천안 등 충청권의 중요 상수원으로 하루 97만여 톤의 생활 및 공업용수를 공급하고 있다(이준배, 2002). 이러한 대청호 유역은 수량 관측점이 6개에 불과하며, 수질 관측지점 또한 유역면적에 비하여 적은 25지점으로 미계측 소유역이 상당부분 존재하며, 하천과 호수가 동시에 존재하여 본 연구의 목적에 적합하므로, 이 유역을 모형의 보정 및 검증 대상유역으로 선정하였다.

대청호 유역은 행정구역상 대전광역시, 충청남북도, 전라북도 및 경상북도 일부를 포함하며, 유역면적은 4,166.8 km^2 (982개 동리)이다. 유역 인구는 총 33만여 명(1998), 축산 사육두수는 총 119만여 두(1998), 산업현황은 총 251업소(1일 폐수발생량 9천7백 m^3/day)이다(Fig. 1).

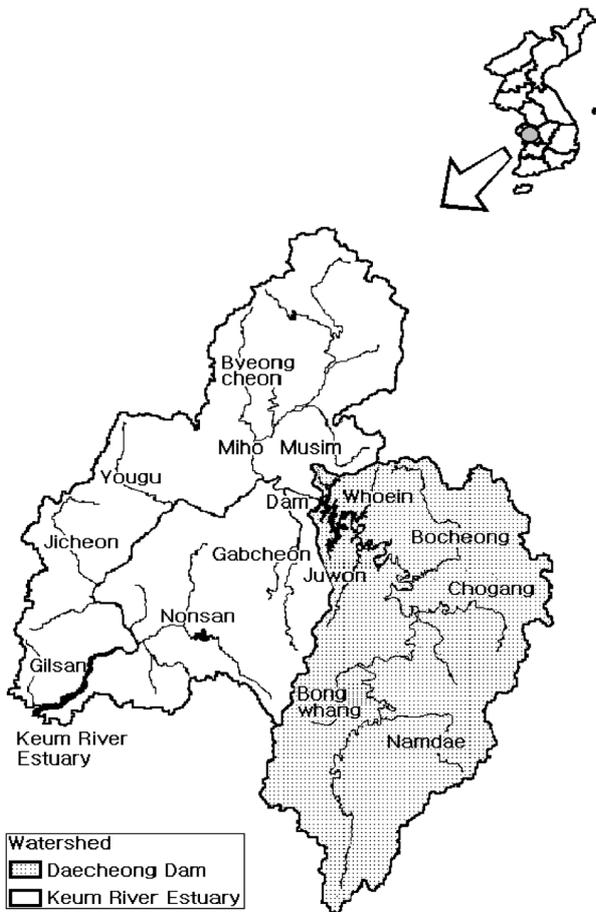


Fig. 1. The geography of Daecheong dam watershed.

2.2.2. 기상자료

금강유역의 중심인 대전축후소의 총 강수량은 1997년 1,765 mm, 1998년 2,070 mm, 1999년 1,455 mm로 나타났는데, 1998년 강수량은 1999년보다 615 mm 정도 더 많은 것으로 나타났다. 강수량의 분포는 5월부터 8월까지 집중되어 1997년 72%, 1998년 67%, 1999년 50%로 나타났으며, 1998년이 월별 편차가 가장 컸으며, 태풍 등으로 인한 폭우로 7~9월의 강우량이 최대를 보였다(기상청, 1997, 1998, 1999).

2.2.3. 오염원 및 원단위

조사된 오염원은 양식장, 토지이용, 미처리 사업장, 하·폐수처리장, 인구 및 축산 현황으로 구분하여 동리별로 정리하였고(환경부, 2000), 해당 동리의 오염부하가 어느 구획으로 배출되는지 표시하였다. 배출원단위는 연구자나 연구기관 별로 그 발표 결과가 상이하므로, 환경부의 오염총량관리 기준 원단위(환경부, 1999b)를 사용하여 오염부하량 산정의 객관성을 유지하였다.

2.2.4. 유량 자료

유량자료는 건설부 측정망 유량이며, 유량연보(건설부, 1997, 1998, 1999) 및 수문자료집(한국수자원공사, 1997, 1998, 1999)에 일별로 수록된 자료를 사용하였다. 또한 공

업용수 취수량, 하·폐수처리장 방류량, 유량자료가 존재하는 농업용 취입보, 양수장의 일별 유량이 물수지 계산에 사용되었다. 유량자료 중 1998년 자료는 모형의 보정에 사용하였으며, 1997년 및 1999년 자료는 모형의 검증에 각각 사용되었다.

1997년 대청댐 연평균 유입량은 96.5 m³/s, 1998년 143.4 m³/s, 1999년 87.7 m³/s로 나타나, 그 해의 강우량과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 1997년 대청댐 연평균 방류 및 취수량은 91.7 m³/s, 1998년 134.7 m³/s, 1999년 88.8 m³/s이고, 대청댐 연평균 수위는 1997년 66.0 m, 1998년 75.0 m, 1999년 73.0 m로 변동하였다.

2.2.5. 수질 자료

사용한 자료는 환경부 측정망 수질이며, 환경연감에 월별로 수록된 자료를 사용하였다(환경부, 1997, 1998a, 1999a). 수질자료 중 1998년 자료는 모형의 보정에 사용하였으며, 1997년 및 1999년 자료는 모형의 검증에 각각 사용되었다.

용포지점의 1997년 연평균 BOD는 0.9 mg/L, 1998년 0.8 mg/L, 1999년 0.8 mg/L이었으며, 대청호 댐지점의 1997년 연평균 BOD는 1.3 mg/L, 1998년 1.1 mg/L, 1999년 1.1 mg/L이었으며, 두 지점의 1999년 TN 평균은 각각 2.38 mg/L, 1.59 mg/L, 1999년 TP 평균은 각각 0.041 mg/L, 0.015 mg/L로 나타났다.

2.2.6. 하도 제원

대청댐 유역의 하천분류 구간 평균 하폭은 하천구간 160 m, 호수 구간 490 m이었으며, 대청댐 부근은 800 m 정도로 조사되었고, 평균수심은 하천구간 2.1 m, 호수 구간 31.0 m이었으며, 대청댐 부근은 43.0 m 정도로 조사되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모형의 보정 및 검증

3.1.1. 구획의 구성

구획의 크기는 대청호 유역의 하천구간 및 호수구간을 Fig. 2와 같이 2 km로 균등하게 분할하였으며, 대청댐 유역은 본류 구간 126개, 유입지천 구간 376개의 격자를 갖도록 하였다. 상류경계는 분할된 130개 소유역 유입지점이며, 하류경계는 취수원 2지점과 댐방류점 1지점이다.

Fig. 2에서 품곡1, 품곡2는 품곡천 유역을 2개의 소유역으로 구분하였음을 의미하며, 상류 경계조건으로 사용된다. 그리고, 각 구획에는 해당 구획번호를 표시하였다. 화살표는 유출입을 표시하며, 유출형태로는 하·폐수처리장 방류량이 있고, 유출형태는 댐방류량, 농업용 보(泫)와 양수장, 상수 및 공업용수 취수장이 있다. C는 수질측정망, Q는 유량 관측망, I는 상수도, 농업 및 공업용수 취수장, D는 생활하수, 공장폐수, 축산폐수처리장의 위치를 나타낸다.

3.1.2. 부하모형

부하모형(LOAD-M)은 소유역의 양식장, 토지이용, 미처

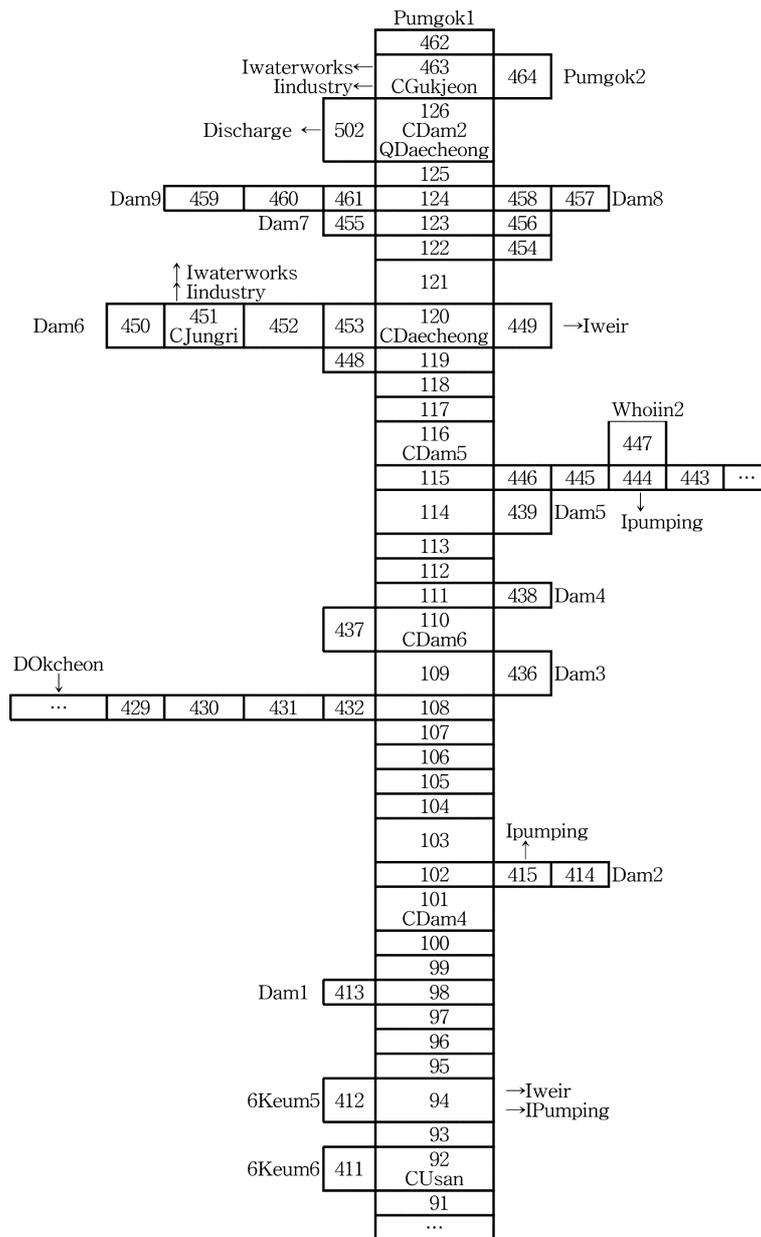


Fig. 2. Segmentation of Daecheong dam watershed for modeling.

리 사업장, 하·폐수처리장, 인구, 축산 현황 자료와 각각의 배출원단위를 이용하여 일(월)별 배출부하량을 계산한다. 계산된 배출부하량을 수질관측지점의 실측유달부하량과 비교하여 구한 수질관측지점 유역의 실측유달율을, 유역의 특성인 유량, 면적 등의 관계식으로부터 구한 부하함수의 회귀계수와 소유역의 특성을 사용하여 미계측 상류 소유역에 적용시킴으로써, 유달부하량을 구한다.

3.1.2.1. 배출부하량

배출부하량은 오염원과 해당 원단위(환경부, 1999b)를 곱하여 구하였으며, 토지용도별 배출부하량은 강우량에 비례한다고 가정하여 년 강우량에 대한 월 강우량의 비율로써 가중치를 주었다. 배출부하량의 분포를 보면, BOD의 경우

축산으로부터의 배출이 전체의 59%, 미처리 인구로부터 21%, 토지로부터 13%를 차지하고, TN 배출부하량은 토지, 축산, 미처리 인구로부터 각각 51%, 33%, 11%를 차지하며, TP 배출부하량은 축산, 토지, 미처리 인구로부터 각각 67%, 21%, 6%를 차지한다.

축산 배출부하량은 하수처리시설로 가지 않고 인근 하천으로 직유입되거나 농지환원을 통하여 재유입되는 양이므로 이를 비점원으로 포함하면, 대청호 유역에서 비점원이 차지하는 비율이 전체의 80%에 이른다.

3.1.2.2. 비유량(比流量)을 통한 미계측 유역의 유량 계산

비유량(Specific discharge)은 단위면적당 유출되는 유량(권순국 등, 2000)으로 정의하며, 상류 소유역의 유량자료

가 거의 없고, 환경부 수질측정망도 유량지표가 없으므로, 건설부 유량 측정망 자료를 이용하여 측정지점별로 상류 소유역에 대한 비유량을 각각 구하였으나, 상하류 유량의 물수지가 일치하지 않으므로 식 (6)을 이용하여 유량 측정망 지점 수에 의한 평균 비유량으로부터 미계측 유역의 유량을 구하였다.

$$Q_j = \sum_{i=1}^N (Q_i * A_j / A_i) / N \quad (6)$$

여기서, Q_j = 유량관측지점 i 의 상류 소유역 j 의 평균 유량(m^3/s), Q_i = 유량관측지점 i 의 유량, A_j = 소유역 j 의 유역면적, A_i = 유역 i 의 유역면적, N = 소유역 j 의 유량이 유입되는 유량관측지점 i 의 개수이다.

3.1.2.3. 실측유달부하량

실측유달부하량은 비유량을 사용하여 수질측정지점의 수질농도와외의 곱으로서 구하였다. 연간 측정지점당 36개의 유달부하량이 계산되는데, 사용한 비유량이 순평균 값이므로 유달부하량 또한 순평균 값이다. 수질자료의 대부분이 강우시 측정자료가 아니므로 변동폭이 크지 않을 뿐만 아니라, 유량에 비하여 그 크기가 작으므로 실측유달부하량의 크기는 전적으로 유량에 의존되는 것으로 나타났고, 연중 변화 형태도 하천 유량 형태와 일치한다.

3.1.2.4. 실측유달율

실측유달율은 실측유달부하량과 수질측정지점 상류 소유역의 배출부하량의 비로써 구하였다. 연간 측정지점당 36개의 유달율이 계산되는데, 사용한 유달부하량이 순평균 값이므로 유달율 또한 순평균 값이다. 유달율이 크다는 것은 배출된 오염물질이 측정지점까지 자정되지 않고 많이 도달되는 것과 배출원단위가 과소평가되었을 경우에 나타나며,

유달율이 작은 것은 반대로 자정되는 양이 많은 경우와 배출원단위가 과대평가 되었을 경우에 나타난다. TN의 경우 대기로부터의 유입으로 유달율이 1.0을 초과한다는 평가(김종오 등, 1999)가 있기는 하나 그 양이 정량화되지는 않았다. 본 연구에서 유달율이 1.0을 초과한 경우는 비유량 사용으로 인한 유량의 과대평가와 수질측정 날짜와 유량측정 날짜의 불일치로 인한 오차가 유달율에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.1.2.5. 유달함수

유달함수를 통계적으로 유도하기 위하여 유역면적과 유량의 함수로써 여러 가지 조합을 검토하였는데, 그 결과는 Table 1에 나타내었다. 여기서, 상대오차는 회귀한 유달율과 실측유달율로부터 계산한 것이다.

회귀분석에 사용한 Software는 SYSTAT(1984)이며, 유달율 회귀결과를 보면, 유역면적의 함수로 설정했을 때 BOD 및 TN의 경우는 TP보다 상대오차가 적었으나, 유량의 함수로써 설정한 경우와 상반된 결과를 보인다. 이 결과로부터 BOD와 TN의 유달율은 유량보다는 유역면적에 더 종속적이며, TP는 유역면적보다 유량에 종속적임을 알 수 있으며, 이는 엄명철(1996)의 결과와 일치한다. 즉, TP는 강우가 있을 때 농도가 증가하나, TN은 중간유출수 등의 영향으로 평시에도 높은 부하율을 보이고 강우시 더 증가하는 실제의 수질 상황을 반영한 것으로 판단된다. 유역면적과 유량의 함수로써, 여러 형태의 회귀식을 검토한 결과, 상대오차가 가장 적은 $R = \alpha A^\beta Q^\gamma$ 식을 사용하였다.

유달함수의 계수는 식 (4)를 사용하여, 실측유달율을 유역면적, 유량과 회귀하여 구하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다. 실측유달율과 회귀한 유달율의 상관계수는 BOD가 0.55, TN이 0.72, TP가 0.35로 나타났다.

3.1.2.6. 유달부하량

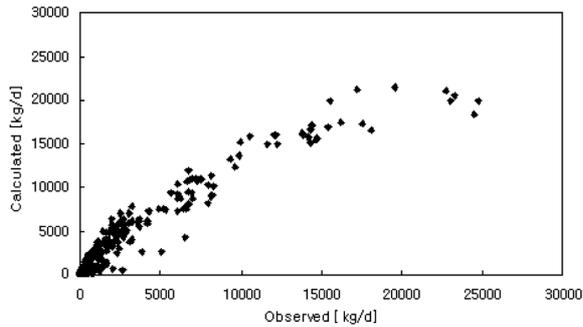
Table 1. Regression analysis of the runoff ratio by items

Item	Regression	Relative error(%)	Regression coefficients			
			α	β	γ	δ
BOD	$R = \alpha A^\beta$	14.6	1.09690	-0.21700		
	$R = \alpha Q^\beta$	-28.8	0.15508	0.04811		
	$R = \alpha(Q/A)^\beta$	-38.4	4.27740	0.73410		
	$R = \alpha A^\beta Q^\gamma$	-7.6	7.27060	-0.78030	0.64160	
	$R = (\alpha A^\beta + \gamma Q^\delta)$	-17.4	1.61662	-0.31336	0.00004	1.65432
T-N	$R = \alpha A^\beta$	9.3	9.11254	-0.20954		
	$R = \alpha Q^\beta$	-47.8	2.52067	0.03474		
	$R = \alpha(Q/A)^\beta$	-38.2	77.64619	0.96917		
	$R = \alpha A^\beta Q^\gamma$	-7.4	135.68566	-1.02018	0.88040	
	$R = (\alpha A^\beta + \gamma Q^\delta)$	-28.0	16.11012	-0.35472	0.01105	1.05812
T-P	$R = \alpha A^\beta$	33.8	0.03127	-0.07230		
	$R = \alpha Q^\beta$	-0.7	0.03359	0.00467		
	$R = \alpha(Q/A)^\beta$	-24.8	0.15701	0.41337		
	$R = \alpha A^\beta Q^\gamma$	18.2	0.32000	-0.03500	0.03000	
	$R = (\alpha A^\beta + \gamma Q^\delta)$	-29.5	233.16698	-0.00007	-233.05821	-0.00006

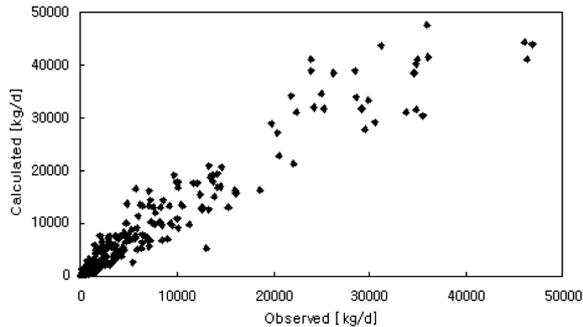
*Remarks : $R = L_a / L_d$

Table 2. Regression coefficients of runoff ratio in Daecheong dam watershed

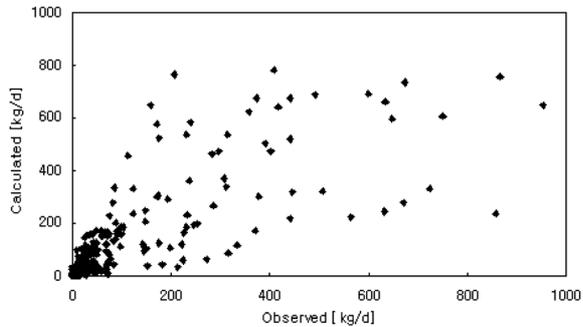
Watershed	BOD			TN			TP			No. of data
	α	β	γ	α	β	γ	α	β	γ	
Daecheong	7.27	0.78	0.64	135.68	1.02	0.88	0.32	0.04	0.03	312
Correlation coefficient	0.55			0.72			0.35			



(a) BOD



(b) TN



(c) TP

Fig. 3. Comparison of observed and calculated runoff loadings of BOD, TN and TP in Daecheong dam watershed.

미계측 소유역의 유달부하량은 식 (5)를 이용하여, 계산된 소유역별 배출부하량과 소유역의 유역면적 및 비유량 그리고 유달함수의 회귀계수로부터 구하였다.

Fig. 3에서 보듯이 BOD, TN, TP의 총 유달부하량의 상대오차는 7.6%, 7.4%, 18.2%를 보이며, 상관계수는 각각 0.92, 0.96, 0.87이었고, 유달부하량은 유달함수와 배출부하량의 곱이므로 유달함수의 오차 영향을 받아 TP의 유달부하량이 가장 많은 편차를 보인다.

토지 및 미처리 축산으로부터의 배출특성이 강우 등 기상요인에 민감하여, 무강우시 유역에 축적되어 있다가 강우시 일시에 하천으로 유입되는 특성을 보이므로, 현재 연평균

단위로 발표된 원단위는 배출부하량의 추정에 커다란 걸림돌로 작용한다. 토지 및 미처리 축산의 BOD 배출부하량이 각각 7,279 kg/d, 33,843 kg/d로서 전체 배출부하량에서 차지하는 비율이 각각 13%, 60%이다. 따라서, 향후 기상요인을 고려한 원단위 관련 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

실측유달을 산정에 필요한 수질농도와 유량자료에 있어서, 수질측정지점 중 유량관측자료가 존재하지 않는 지점이 전체의 26지점 중 24지점이므로, 부득이하게 비유량 방법을 통해 유량을 계산하였을 뿐만 아니라, 유량이 존재하더라도 환경연감의 수질자료는 월 자료로만 명시되어 있어 현 상황에서 정확한 유달부하량을 계산하는데는 한계가 있으므로 오염총량관리제도 및 수질환경평가 등을 수행하려면 유량 및 수질자료의 공존이 절대적으로 필요하다.

유달율을 추정하는 부하함수는 유량 및 유역면적의 회귀식으로 구성되어 있는데, 각각의 회귀결과, 회귀식의 인수를 추가시킴에 따라 개선점이 보이므로 관련 인수의 추가나 변경 등에 대한 연구가 필요하다.

3.1.3. 수리모형

수리모형(DYN-M : Modified DYNHYD5)은 소유역의 유출·유입량을 입력자료로 하여 계산구획별 유속, 수심을 계산한다.

DYNHYD5와 다른 점에는 상류와 하류조건이 Junction번호의 크기에 따라 내부에서 뒤바뀌는 것과 출력하일(*.DDF 및 *.HYD)의 Junction유량 결과 출력을 정정한 것이 있으며, 입력 가능한 가변유량의 개수를 충분히 확장하여 하천의 지류가 다수 존재할 경우에도 적용할 수 있도록 하였고, 시간별 관심구획의 유량, 수위, 유속, 부피를 별도로 출력하게 함으로써, 통계처리나 도표 작성이 편리하도록 하였다.

수리모형의 보정계수는 Manning의 n과 계산시간 간격이 있는데, Manning n 계수는 하천정비기본계획서에서 자주 보이는 하천구간의 0.03을 참조하여 한강 및 팔당호 수리모델 보정에서 얻은 경험/결과를 차용하였으며(서울시정개발연구원, 1994; 신동석과 류재근, 1999), 조도계수의 경우 하천구간은 0.030, 호수구간은 0.020으로 하였으며, 계산시간 간격은 60초로 하여 보정하였다.

입력된 순평균 자료를 이용한 연평균 수위 및 유량은 71.5 m, 119.6 m³/s로써, 일 수위 및 유량자료의 연평균 값 71.5 m, 143.4 m³/s와 약간의 차이가 있었으나, 이는 순평균을 다시 평균하여 생긴 것이며, 모의한 순별 결과의 연평균 수위 및 유량은 73.4 m, 107.8 m³/s로 나타났으며, 실측값과 계산값의 상관계수는 0.94 및 0.81이었으며, 보정 결과는 Fig. 4~5와 같다.

대청댐 지점의 입력된 순평균 자료를 이용한 연평균 유량은 1997년 98.0 m³/s, 1999년 88.0 m³/s이고, 모의한 순별 결과의 연평균 유량은 각각 90.8 m³/s, 84.8 m³/s로 나타났으며, 실측값과 계산값의 상관계수는 각각 0.99 및 0.98이다. 검증결과가 보정결과보다 조금 나아 보이는 것은 년 강우자료에서 알 수 있듯이 1998년은 태풍 등으로 인한 홍수의 영향을 받아 하천유량이 급격히 변동하여 유량의 표준편차가 234.0인데 비하여 1997년 및 1999년은 각각 160.0, 99.0인데 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서 사용한 수리모형은 급격한 수량변동이나 수면승강에 따른 변화를 해석하는 데는 적합하지 않는 것(Ambrose et al., 1993)이 확인되었으므로 이에 대한 개선이 필요하다.

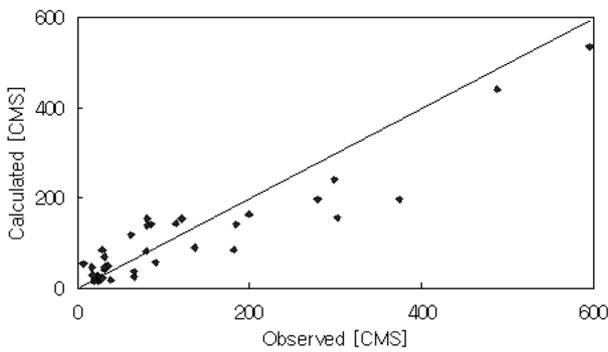


Fig. 4. Comparison of observed and calculated flow rate at Daecheong dam in 1998.

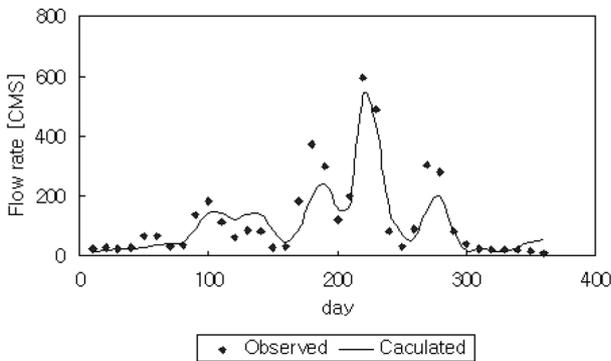


Fig. 5. Calibration result of flow rate at Daecheong dam in 1998.

3.1.4. 수질모형

수질모형(EUT-M : Modified EUTRO5)은 하천 및 호수에서 설정된 구획별 수질을 시계열로 모의한다. EUTRO5와 다른 점에는 변수의 배열을 충분히 확장하여 하천의 지류가 다수 존재하는 대규모 수계에도 적용할 수 있도록 하였으며, 시간별 관심구획의 수질결과를 별도로 출력하게 함으로써, 통계처리나 도표 작성이 편리하도록 한 것이 있다. 또한, 하천모형인 QUAL2모형처럼 수리조건 및 지형조건에 따라 구획별로 반응계수를 입력할 수 있도록 하고, 국내에서 측정하는 항목으로 경계조건 수질을 변경하여 내부에서 계산되는 CBOD, ON, OP의 값을 입력한 BOD, TP, TP, Chl-a로써 자동 계산하도록 하였다. 경계농도 변경에 따른 계산은 다음의 식 (7)~(9)을 이용하였다.

$$BOD_5 = CBOD (1 - e^{-5k_n}) + \frac{64}{14} NH_4 (1 - e^{-5k_{11}}) + k_{s1} k_{46} \frac{Chl-a}{1000} (1 - e^{-5(k_{30} + k_{32})}) \quad (7)$$

$$TP - PO_4 = a_{pc} * a_{pc} * \frac{Chl-a}{1000} + OP \quad (8)$$

$$TN - NH_4 - NO_3 = a_{nc} * a_{pc} * \frac{Chl-a}{1000} + ON \quad (9)$$

여기서, BOD₅ = 5일간 생물화학적 산소요구량 (mg/L), TP = 총인 농도 (mg/L), TN = 총질소 농도 (mg/L), k = 탈산소 상수(day⁻¹)이다. a_{nc} = Chl-a 생체내 N/C 비율(mg-N/mg-C), a_{pc} = Chl-a 생체내 P/C 비율(mg-P/mg-C), OP = 유기인, ON = 유기질소, Chl-a : 클로로필-a, 1000 = 환산계수(mg/L)/(μg/L)이다.

WASP모형의 기본 값을 기초로 반응계수를 선정하고 수질측정값과 계산값이 일치되도록 조정하였으며, 조정된 주요 반응상수는 Table 3과 같다. EUTRO5 모형에서는 반응상수가 전체 구획에 동일하게 사용되나 EUT-M 모형에서는 반응상수가 계산구획별로 다르게 입력될 수 있으므로 범위로 표시되었다. 경계조건 수질의 반응상수는 0.001로써 최소화시켜 경계지점에서 자체적으로 자정/반응되지 않도록 하였으며 본류구간에 유입된 후에는 다른 연구자의 결과와 EUTRO5 모형의 기본 값으로부터 보정을 시작하였다.

Table 3. Reaction coefficient of water quality model

(Unit : day⁻¹)

Name of reaction coefficient (ISC)	Adapted values in models	
	EUTRO5 model	EUT-M model
Nitrification (11)	0.09-0.13	0.001 ~ 0.100 (0.067)
Denitrification (21)	0.09	0.001 ~ 0.025 (0.018)
Chl-a Growth (41)	0.5-2.5	0.001 ~ 2.500 (1.600)
Deoxygenation (71)	0.16-0.25	0.001 ~ 0.150 (0.087)
Reaeration (82)	-	0.001 ~ 2.500 (1.900)
ON Mineralization (91)	0.075	0.001 ~ 0.050 (0.035)
OP Mineralization (100)	0.22	0.001 ~ 0.050 (0.035)

*Remarks : 1. ISC = Integer of System Constant
2. () = average value

3.1.5. 모형의 보정

부하모형과 수리모형의 결과인 유달부하량과 유량을 입력하여, 각각의 수질항목의 반응계수를 조정해가면서 실측값과 계산값의 편차를 줄이는 시행착오법으로 보정하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다.

용포 및 대청댐의 평균 BOD 농도는 0.8 mg/L 및 1.0 mg/L로 관측되었으며, 모의한 결과는 각각 0.9 mg/L와 0.9 mg/L로 나타났다. 대청댐 상류인 용포지점의 1998년 강우와 하천유량은 일치된 경향을 보이고 있으나, 겨울을 제외하면 수질과는 상반된 경향을 보인다. 따라서, 용포지점의 50일, 170일 BOD의 모의발생 결과 같은 피크 농도들은 하천의 유량이 적거나 시기적으로 급격히 감소된 때 나타나고 있으므로, 갈수기에 호수 및 하천에 조류(藻類)가 발생하거나 수질이 악화되는 실제현상이 재현되었으며, 하천의 상시 유량을 증대시키는 것이 양호한 수질유지에 도움이 될 것으로 판단된다.

용포 및 대청댐의 평균 TN 농도는 2.3 mg/L 및 1.6 mg/L로 관측되었으며, 모의한 결과는 각각 2.5 mg/L와 1.4

mg/L로 나타났다. 연평균 값은 어느 정도 일치하고는 있으나, 순별 모의결과는 계절에 따라 차이를 보인다. 모의결과, 하천구간인 용포지점보다는 호수구간인 대청댐에서의 수질 변동은 매우 작게 나타났는데, 이는 호수의 내용적이 크므로 그 만큼 외부의 충격부하에 대하여 하천보다 덜 민감하게 반응하는 것과 일치하였다.

용포 및 대청댐의 평균 TP 농도는 0.04 mg/L 및 0.02 mg/L로 관측되었으며, 모의한 결과는 각각 0.01 mg/L와 0.02 mg/L로 나타났다. 대청댐의 연평균 값은 어느 정도 일치하고는 있으나, 하천구간인 용포지점에서는 차이를 보인다. 특히, 장마기인 6월 이후 그러한 경향이 뚜렷한데, 이는 권순국(1998)의 결과에서 보듯이 TP의 유달 특성이 유량과 거리가 멀기 때문이며, Fig. 3에서 보듯이 BOD나 TN에 비하여 실측유달부하량과 계산유달부하량의 차이와 산포도가 컸기 때문으로 여겨진다.

TP는 전체적으로 농도가 낮고, BOD나 TN과는 다르게 분해소멸 특성이 없이 조류에 축적되거나 호수 저층 또는 댐 방류수와 함께 시스템 밖으로 이동되며 연간 최하 0.01

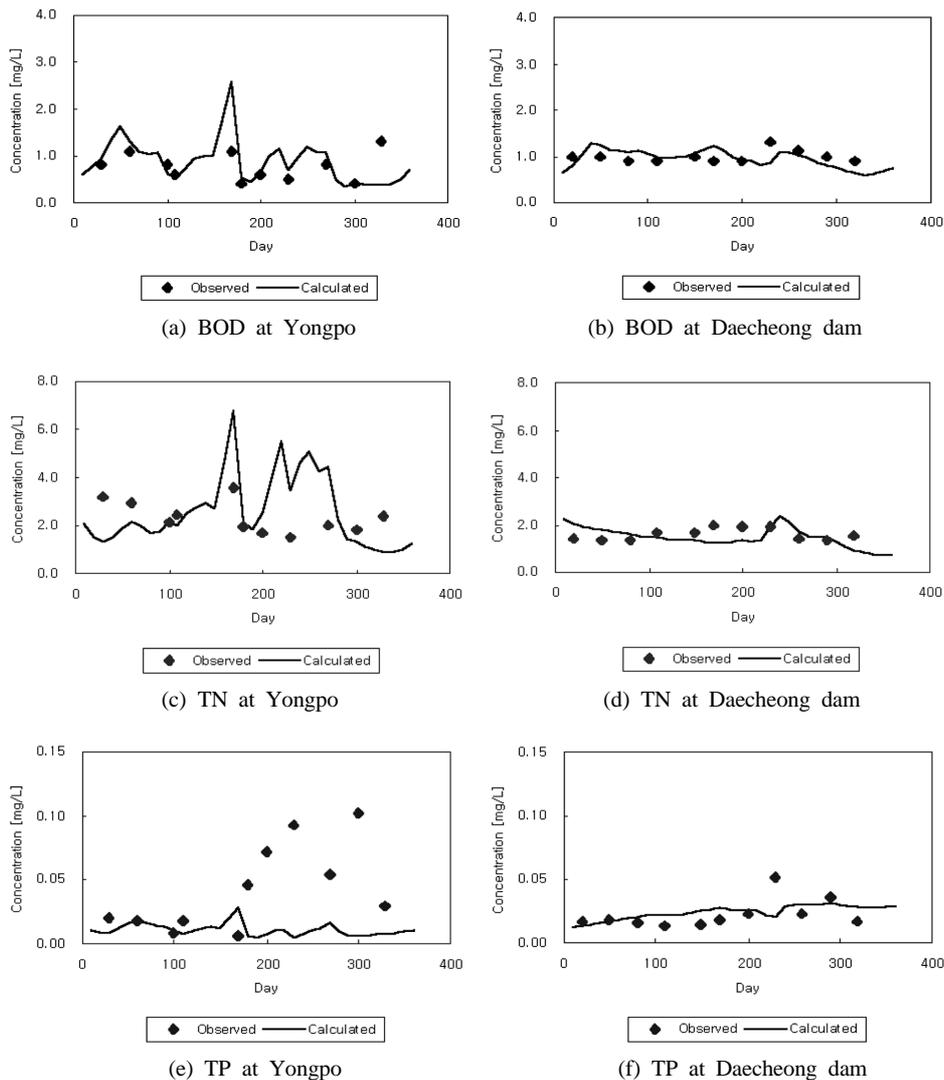


Fig. 6. Calibration results of BOD, TN and TP at Yongpo and Daecheong dam in 1998.

mg/L가 유지되므로, 대청댐지점의 모의결과는 조류의 사멸과 증식에 따른 인의 순환과 관련되어 나타난 현상으로 판단된다.

수질모형의 결과는 앞서 언급한 바와 같이, 하천유량의 증감에 따라 부하모형의 결과가 연동하므로, 이에 따라 수질이 변화하는 것으로 모의되었고, 갈수기에 호수 및 하천에 조류(藻類)가 발생하거나 수질이 악화되는 실제현상이 재현되었으므로, 하천의 상시 유량을 증대시키는 것이 양호한 수질유지에 도움이 됨을 확인할 수 있었다.

3.1.6. 모형의 적용

모형의 적합성을 판단하기 위하여 동일 유역인 대청댐유역을 대상으로 1999년의 자료를 이용하여, 부하모형과 수리모형을 각각 수행하고 보정된 반응상수를 적용하여 실측값과 계산값을 비교하였는데 모의 결과는 Fig. 7과 같다.

용포 및 대청댐의 1999년 평균 BOD 농도는 0.8 mg/L 및 1.0 mg/L로 관측되었으며, 모의한 결과는 각각 1.1

mg/L와 1.5 mg/L로 나타나, 보정시와 비슷한 정도의 결과를 보였다. 1999년은 1998년에 비하여 커다란 홍수가 없었으며, 월별로 완만한 강우분포를 보이므로, 이에 따라 하천의 유량도 급격한 변동이 적어 BOD의 모의발생 결과가 1998년처럼 특정시기에 급변하는 경향은 나타나지 않았으며, 보정년도에 비해 전체적인 모의농도의 상승은 유량의 감소에 기인된 것으로 판단된다.

용포 및 대청댐의 평균 TN 농도는 2.4 mg/L 및 1.7 mg/L로 관측되었으며, 모의한 결과는 각각 2.6 mg/L와 1.8 mg/L로 나타났다. 연평균 값은 일치하고는 있으나, 순별 모의결과는 계절에 따라 차이를 보이며, BOD처럼 1998년보다는 피크농도의 출현이 줄었다. 모의결과, 하천구간인 용포지점보다는 호수구간인 대청댐에서의 수질변동은 매우 작게 나타났는데, 이는 보정시의 해석과 동일한 이유로 설명된다. 용포 및 대청댐의 평균 TP 농도는 0.04 mg/L 및 0.01 mg/L로 관측되었으며, 모의한 결과는 각각 0.01 mg/L와 0.03 mg/L로 나타났다. 용포지점은 장마기인 6월 이후

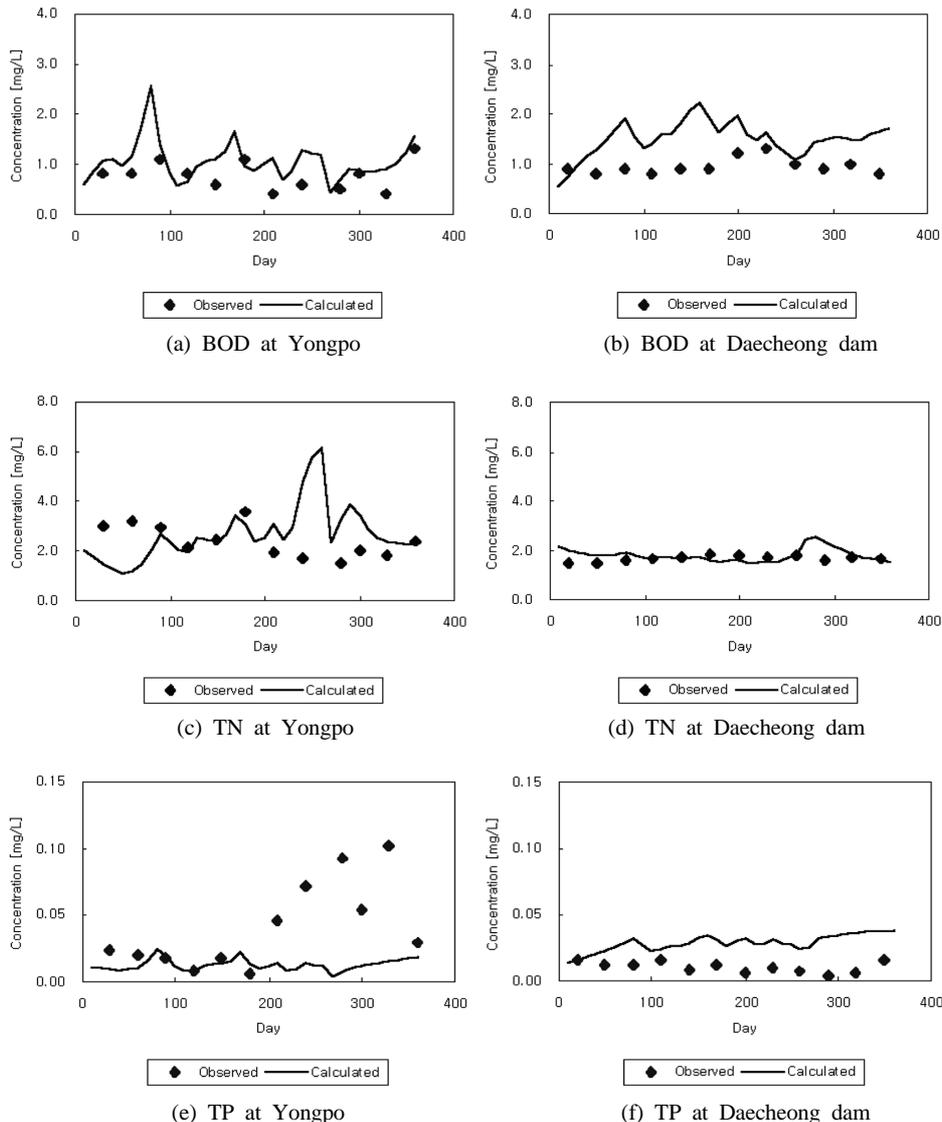


Fig. 7. Verification results of BOD, TN and TP at Yongpo and Daecheong dam in 1999.

편차가 뚜렷한데, 이는 보정시 나타난 결과와 같다.

모형 보정의 적합성을 판단하기 위하여 동일 유역인 대청댐유역을 대상으로 1997년의 자료를 이용하여, 부하모형과 수리모형을 각각 수행하고 보정된 반응상수를 적용하여 실측값과 계산값을 비교하였는데, 모의 결과는 Fig. 8과 같다.

용포 및 대청댐의 1997년 평균 BOD 농도는 0.9 mg/L 및 1.2 mg/L로 관측되었으며, 모의한 결과는 각각 1.5 mg/L와 1.5 mg/L로 나타나, 1999년과 비슷한 정도를 보였다. BOD의 모의발생 결과 중 8월 이후 용포지점은 강우 부족으로 하천유량이 적어져 나타난 결과로 해석되며, 호수 구간에서는 체적의 증가로 이러한 농도의 돌출이 누그러든 것으로 판단된다.

용포 및 대청댐의 평균 TN 농도는 2.5 mg/L 및 1.7 mg/L로 관측되었으며, 모의한 결과는 각각 2.5 mg/L와 3.4 mg/L로 나타났다. 용포지점은 BOD의 경우처럼 하천유량이 적어져 8월 이후 증가된 농도가 12월까지 유지되다 감소하였으며, 대청호는 초기의 농도가 큰 변동 없이 12월까지 유지되었는데, 이는 1998년과 1999년의 수온에 비하여

연평균 2°C 가량 높아 이로 인한 수질항목간의 변형으로 높아진 것과 유속의 감소 및 유출량의 감소로 댐에서 외부로 빠져나가는 양이 줄었기 때문으로 판단되며, BOD 농도의 경향도 같은 맥락에서 이해된다.

용포 및 대청댐의 평균 TP 농도는 0.04 mg/L 및 0.03 mg/L로 관측되었으며, 모의한 결과는 각각 0.03 mg/L와 0.03 mg/L로 나타났다. 1998년과 1999년에는 용포지점의 농도가 과소평가되었으나, 1997년은 적절히 모의하는 것으로 나타난 것은 TN의 경우처럼 체류시간의 증대로 나타난 것으로 해석된다.

보정 및 검증결과를 볼 때, 부하모형으로부터 계산된 유달량은 모형의 가설에서 설정한 유량의 함수로서 작용을 하고 있으며, 수질은 유량과 상반된 경향을 보여, 하천의 유량이 적거나 시기적으로 급격히 감소된 갈수기에 호수 및 하천에 조류(藻類)가 발생하거나 수질이 악화되는 실제 현상이 재현되었다. 모의결과, 하천구간보다는 호수구간에서의 수질변동은 매우 작게 나타났는데, 이는 호수의 내용적이 크므로 그 만큼 외부의 충격부하에 대하여 하천보다

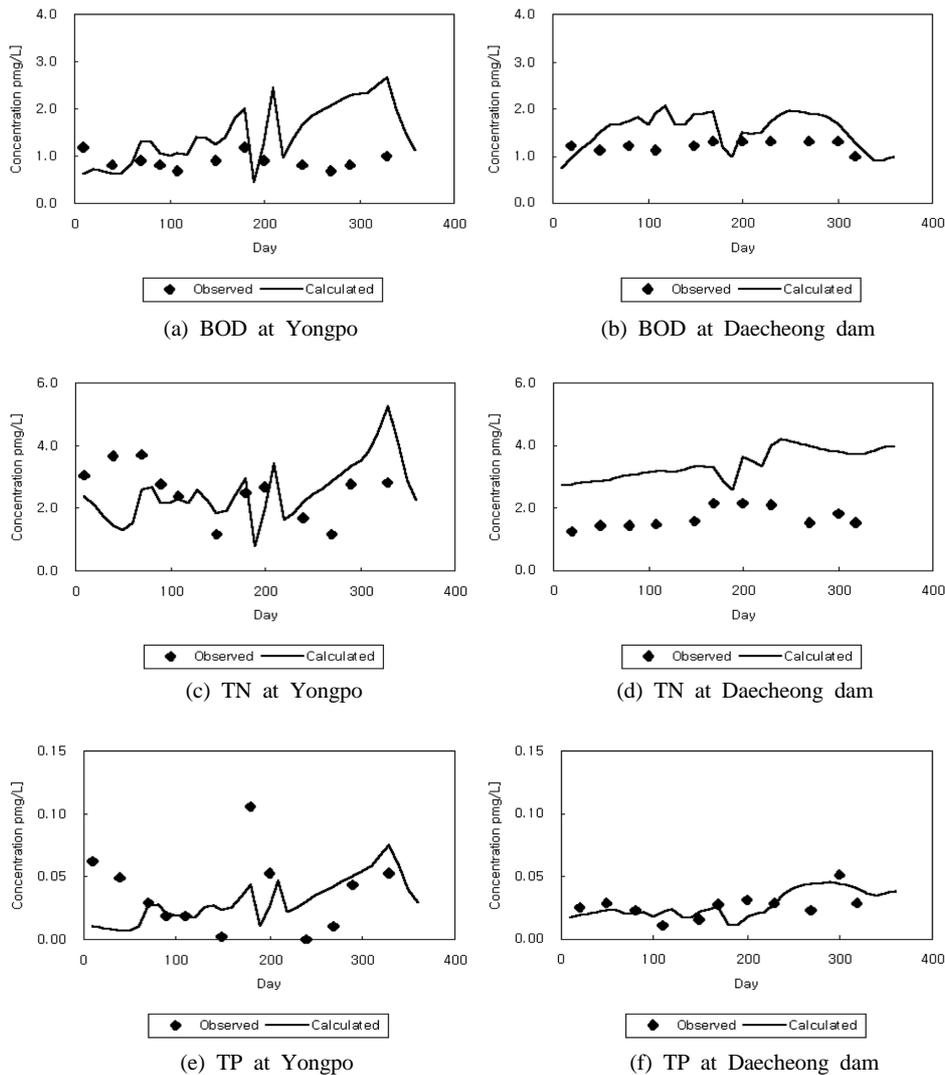


Fig. 8. Verification results of BOD, TN and TP at Yongpo and Daecheong dam in 1997.

덜 민감하게 반응하는 것과 일치하여, 하천구간과 호수구간이 연계된 수체를 적절히 모의하는 것으로 나타났다.

한편, 농도차이의 원인은 우선, 수질자료(월 1회)의 지점별 채수 날짜가 불일치하고, 수질측정망 26개 중 2개만 유량측정망과 일치하며, 상하류간 물수지 불균형으로 인한 비유량 계산의 오차, 원단위의 획일성 등으로 누적된 오차의 결과로 나타난 것으로 판단되며, 이는 가용한 자료의 구조적인 문제이므로 추후 보완·연구되어야 할 과제이다. 특히, 수질농도가 년 중 변화가 없거나 특정 시기에 피크가 나타나는 실측자료는 무강우시 평시 측정이라는 현재 측정 방식과 연관되어 있으므로, 일별로 측정되거나 강우에 의한 영향이 고려되는 수질자료가 구축되어야 적절한 유역의 오염관리 대책을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

수질, 수량의 관측자료가 없는 상류유역의 오염부하량을 계산하는 부하모형과 수질, 유량 관측자료가 부족한 유역의 수질환경관리를 위해 수정모형(WASP-M)을 개발하였다. 대청댐 유역을 대상으로 모형의 적합성 및 실용성을 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실측유달을 산정에 필요한 유량과 수질자료에 있어서, 측정지점 중 유량관측자료가 존재하지 않는 지점이 많아 비유량 방법 등 유량산정 모형을 적용하여 산정하고, 유량을 측정하더라도 환경연감 등 수질측정 자료는 월 1회 정도의 관측치가 많으므로, 현 상황에서 정확한 유달부하량을 계산하는데는 한계가 있으므로 오염총량 관리제도 및 수질환경평가 등을 수행하려면 유량 및 수질자료의 동시 측정이 절대적으로 필요하다.
- 2) 부하모형의 결과, 1998년 대청호유역의 BOD, TN, TP의 총 유달부하량의 상대오차는 7.6%, 7.4%, 18.2%를 보이며, 상관계수는 각각 0.92, 0.96, 0.87이었고, TP의 유달부하량이 가장 많은 편차를 보였다. 금강하구 유역의 BOD, TN, TP의 총 유달부하량의 상대오차는 각각 44%, 32%, 26%이고 상관계수는 0.91, 0.96, 0.87을 보였다. 위와 같은 결과를 볼 때, 자료의 분산이 나타나는 하나, 제한된 자료로부터 실측치와 계산치가 유사한 경향을 가지므로 미계측 유역에 적용이 가능하다고 판단된다.
- 3) 수리모형의 결과, 대청댐 지점의 1998년 연평균 유량은 119.6 m³/s, 모의한 연평균 유량은 107.8 m³/s로 나타났으며, 실측값과 계산값의 상관계수는 0.81이었고, 1997년은 각각 98.0 m³/s, 1999년 88.0 m³/s이고, 모의결과는 각각 90.8 m³/s, 84.8 m³/s로 나타났으며, 실측값과 계산값의 상관계수는 각각 0.99 및 0.98이었다. 검증결과가 보정결과보다 조금 나아 보이는 것은 유량의 표준편차가 1998년 234.0인데 비하여 1997년 및 1999년은 각각 160.0, 99.0인데 기인한 것으로 판단된다. 위와 같은 결과를 볼 때, 실측값에서 자료의 왜곡이 보여지고, 계산값이 실측치와 차이가 있기는 하나, 현재 가용한 자료로

부터 모의발생한 수리계산결과는 실측치와 계산치가 일관된 경향을 보이므로 수질예측에 무리가 없다고 판단된다.

- 4) 수질모형의 결과, 용포 및 대청댐의 1998년 평균 BOD 농도는 0.8 mg/L 및 1.0 mg/L, 모의한 결과는 각각 0.9 mg/L와 0.9 mg/L로 나타났고, 1999년 평균 BOD 농도는 0.8 mg/L 및 1.0 mg/L, 모의결과는 각각 1.1 mg/L와 1.5 mg/L로 나타났으며, 1997년 평균 BOD 농도는 0.9 mg/L 및 1.2 mg/L, 모의결과는 각각 1.5 mg/L와 1.5 mg/L로 나타나, 보정·검증의 결과가 비슷한 정도를 보였다.

본 연구에서 개발한 수질예측방법은 아직 개선할 부분이 남아 있기는 하나, 유량 및 수질측정자료가 부족한 국내의 현 상황에서 오염부하량의 산정과 수질예측에 실용적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

건설부(1997, 1998, 1999). 유량연보.
 공동수(1992). 팔당호의 유수생태학적 연구. 박사학위논문, 고려대학교.
 권순국(1998). 우리나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안. *대한환경공학회지*, 20(11), pp. 1497-1510.
 권순국, 이근후, 김선주, 이순혁, 김태철, 최예환, 서승덕, 최진규, 윤광식(2000). *신고 응용수문학*, 향문사.
 기상청(1997, 1998, 1999). *기상월보*.
 김원만(1990). *팔당호 시험준설 영향조사보고서*. 한국수질보전학회, 환경처.
 김종오, 유환희, 김옥선, 박중석(1999). ARIMA 모형을 이용한 진양호 수질의 장래예측. *한국습지학회지*, 1, pp. 17-28.
 김준현, 이윤석, 이영한(1995). 환경관리 및 분석 : 팔당호 수질 관리 모형의 개발(III)- 상류가중유한요소법을 이용한 다차원 부영양화 모형의 개발 및 검증-. *춘계학술연구발표회 논문집*, 대한환경공학회, pp. 419-423.
 서울시정개발연구원(1994). *한강분류 수질관리 효율화 방안 연구*.
 신동석, 권순국(1999). 수리모형을 이용한 팔당호의 유속분포 모의시험. *한국환경농학회지*, 18(1), pp. 18-23.
 신동석, 류재근(1999). RMA모형을 이용한 팔당호 수질의 예측(I). *한국물환경학회지*, 15(1), pp. 99-105.
 임명철(1996). 수질의 일유출 부하량에 관한 연구. 석사학위논문, 서울대학교.
 이준배(2002). 대청호유역 오염부하량 산정과 평가모델. 박사학위논문, 충남대학교.
 조흥연, 전경수, 이길성(1993). WASP4모형에 의한 수질모델링. *한국해양·해양공학학회지*, 5(3), pp. 221-231.
 최종오(1995). 낙동강수계의 유기물 수지와 식물플랑크톤의 일차생산에 의한 내부생성부하량의 기여도. 석사학위논문, 강원대학교.
 최지용, 박원규, 박용화, 한화진(1995). *비점오염원 조사연구 사업 보고서*. 한국환경기술개발원.
 한국수자원공사(1997, 1998, 1999). *수문자료집*.
 환경부(1997, 1998a, 1999a). *환경연감*.
 환경부(1998b). 팔당호등 한강수계 상수원 수질관리 특별종합대책 : 맑은 한강-새천년의 대계-, 환경부 수질정책과.

- 환경부(1999b). 오염총량관리계획수립지침, 환경부고시 제 1999-143호.
- 환경부(1999c). 금강권역 수질정책지원시스템을 이용한 수질관리모델링 결과보고서.
- 환경부(2000). 전국 오염원 조사 및 DB 구축, 국립환경연구원.
- 황인성(1991). 생태학적 모형을 이용한 팔당호의 수질 분석과 모형의 감응도 분석. 석사학위논문, 서울대학교.
- Ambrose, R. B., Wool, T. A., and Martin, J. L. (1993). WASP5, A hydrodynamic and water quality model-Model Theory, User's Manual and Programmer's Guide. Environmental Research Lab., Office of Research and Development, Athens, Georgia. U.S.A.
- Beasley, D. B., Huggins, L. F., and Monke, E. J. (1980). ANSWERS : A Model for Watershed Planning. *Trans. of ASAE*, **23**(4), pp. 938-944.
- Benamen, J., Amstrong, N. E., and Maidment, D. R. (1996). *Modeling of DO in the Houston Ship Channel using WASP5 and GIS*, The University of Texas at Austin.
- Chen, C. L., Gomez, L. E., Chen, C. W., Wu, C. M., Lin, J. J., and Cheng, I. L. (1995). An integrated watershed management model with GIS and windows application. *The International Symposium on Water Quality Modeling, The Society for Engineering in Agricultural Food and Biological System*, Orlando, Florida, pp. 242-250.
- Depinto, J. V., Lin, H., Guan, W., Atkinson, J. F., Densham, P. J., Calkins, H. W., and Rodgers, P. W. (1994). Development of GEO-WAMS: An approach to the integration of GIS and Great Lakes Watershed analysis models. *Special issue of Microcomputers in Civil Engineering*, **9**, pp. 251-262.
- Karina, T. L. I. (1996). Feasibility of modeling phosphorus dynamics in storm water wetlands. M. Sc. Thesis, The University of Guelph, Canada.
- Park, K. (1993). A model study of hydrodynamic and water quality characteristics of the Rappahanock Eatuery. Virginia, Ph. D. Thesis, The College of William & Mary, VA.
- Simachaya, W. (1999). Integrated approaches to water quality management using GIS and the WASP5 simulation model - application to the Chin River Basin, Thailand -. Ph.D. Thesis, The University of Guelph, Canada.
- SYSTAT (1984). *The System for Statistics*, SYSTAT Inc.
- Warwick, J. J., Cockrum, D., and Horvath, M. (1997). Estimating nonpoint source loads and associated water quality impacts. *J. of Water Resources Planning and Management*, **123**(5), pp. 302-310.