

## 부영양화모델 EUTRO5를 이용한 메릴랜드 연안만의 수질관리

황병기 \*

### I. 서론

현재 3분의 2정도가 농업지역이며 27%는 삼림지 그리고 도시 등의 개발지역이 약 6%를 차지하고 있는 대부분의 미개발지역으로 구성된 미국 동부 지역에 대서양과 접해있는 메릴랜드 연안만이 최근들어 Ocean City라는 도시를 중심으로 급속한 산업발전을 하고 있어 그로 인한 도시생활하수 등 하.폐수의 증가로 부영양화가 우려되고 있다.

최근에 메릴랜드 주 환경부(Maryland Department of the Environment)는 연안만의 수계를 대상으로 현재 수질상태에 대한 연구보고에서 당면과제는 수층의 부영양화이며 앞으로 더욱 가속될 것이라는 우려를 표명하였다<sup>1)</sup>. 토지사용도와 부영양화 조건들 사이의 상호관계를 파악하기 위하여 만으로 유입되는 비오염원의 영양부하를 조사하였다. 지표면유출에 의한 영양염, 부유고형물, BOD 등의 부하량을 산출하기 위하여 대상 수계를 23구역의 소수계(subwatersheds)로 나누어져 분석하였다. 환경감시 자료의 연구분석을 토대로 수계에 대한 미래의 토지사용은 총인 및 총질소 등의 농도의 감소에 큰 영향을 미치지 않을 것이어서 현재의 부영양화는 개발의 팽창으로 인해 계속 문제점으로 남아있을 것이 예상된다는 결론을 내리고 장기적인 수질감시 체제의 구축과 토지사용의 변화에 따른 수질의 변화를 예측할 수 있는 시뮬레이션 모델의 개발이 시급함을 강조하였다.

이에 본 연구는 Boynton 등<sup>1)</sup>의 환경탐사에서 얻어진 자료를 가지고 현재의 수질상태를 정확하게 파악하고 현재의 오염부하량에 근거를 두고 미래의 토지사용 계획안을 참고로 하여 향후 수년간의 수체의 반응을 예측하여 수계를 관리할 수 있는 모델을 개발하였다.

이 연구의 목적이 다음과 같이 세분되었다.

1. 연해만의 각 소수계(subwatersheds)가 수체(water body)의 부영양화에 어떤 영향을 끼치는 지를 파악.
2. 수층의 물질수지 입장에서 영양염의 유입원(sources)은 무엇이며 유출원(sinks)은 무엇인 지를 이해하기 위하여 모델링 결과에 기초하여 수층에서 영양염의 증감을 계산.
3. 여름 갈수 상태에서 수계로 부터 어떤 경로를 통하여 수층으로 유입되는 지 또한 일단 수층에 유입된 오염물질이 수층내에 어느 정도 체류하는 지를 결정.

---

\* 상명대학교 환경공학과

4. 연구대상 수계에서 미래의 토지사용도의 변화에 따른 수층의 수질특성의 변이를 예측.

이러한 목적을 달성하기 위하여 미연방 환경처에서 개발된 수질예측 모델인 WASP/EUTRO5 모델링 프레임워크<sup>2)</sup>을 이용하였다. 수질모델의 실행의 중요한 정보인 시스템에서 물질이동과 유체의 흐름을 계산하기 위하여 수심평균 이차원 수리모델<sup>3)</sup>을 이용하였다.

## II. 연구내용 및 방법

### 1. 모델 개발

박스모델 개념을 도입하여 임의의 구간에 대하여 물질수지 방정식을 유한차분법으로 표시하면 다음과 같다.

$$V_k \frac{dC_{mk}}{dt} = \sum [-Q_{kj}(\alpha_{kj}C_{mk} + \beta_{kj}C_{mj}) + E'_{kj}(C_{mj} - C_{mk})] \pm V_k K_{mnk} C_{mk} + W_{mk}$$

위 식에서  $C_{mk}$ 는 구간k에서 수질인자m의 농도 [ $ML^3$ ],  $V_k$ 는 구간k의 체적 [ $L^3$ ],  $Q_{kj}$ 는 구간k 부터 구간j 까지 advective 유량 [ $L^3T$ ],  $E'_{kj}$ 는 구간 k와 j사이의 조석확산흐름 [ $L^3T$ ] =  $E_{kj}A_{kj}/\bar{L}_{kj}$ ,  $E_{kj}$ 는 구간 k와 j사이의 확산계수 [ $L^2T$ ],  $A_{kj}$ 는 구간 k와 j사이의 단면적 [ $L^2$ ],  $\bar{L}_{kj}$ 는 인접 분할 구간의 길이 [ $L$ ],  $K_{mnk}$ 는 수질인자 m, n의 상호작용을 고려한 구간k의 1계 감쇄반응상수 [ $T^{-1}$ ],  $W_{mk}$ 는 구간k에서 수질인자m의 source 또는 sink를 나타낸다. 여기서  $\alpha_{kj}, \beta_{kj}$ 는 유한차분법의 수치계산 방법에 따라 구간k의 농도와 구간j의 농도의 비중을 어느정도 비율로 할 것인가에 따라서 0에서 1사이의 수를 취하며  $\alpha_{kj}, \beta_{kj}$ 의 합은 항상 1이어야 한다.

위 식의 첫 번째 항은 비조석 흐름일 때 구간k에 대해서 질량이 나가고 들어오는 것을 표시하며, 두 번째 항은 조류가 반전할 때 조석확산 영향을 나타낸다. 이 항에서 확산과 혼합과정으로 인한 질량변화는 인접 분할구간 사이의 농도차에 비례한다고 가정했다. 흐름과 확산에 의한 영향의 합은 분할 구간k를 경계면으로 하는 모든 구간j에 대하여 확대 적용된다. 매개 변수의 1차 감쇄가 세 번째 항으로 계산되며, 마지막 항은 각 매개 변수의 외부로부터 sources (유입 또는 증가) 및 sink (방출 또는 감소)를 포함한다.

### 2. 모델 입력인자 산출

수질관리 모델링에서 주된 작업은 질량 운송 계수들 (속도, 확산)를 계산하고 반응식을 도출하고 이 식과 관련된 반응상수를 구하여 모델링에 필요한 매개 변수를 결정하는 데 있다.

수층에서의 반응역학을 수식화하기 위하여 많은 매개변수 및 상수 등이 사용되었

다. 수질인자들의 경계치 조건들은 현장 실측치로 부터 직접 얻거나 영양염 부하량은 환경감시 프로그램으로 부터 얻어진 자료로 부터 독립적으로 산출하였으며 독립적으로 파악할 수 없는 계수들은 선행연구 문헌을 참고로 하였다<sup>4),5)</sup>.

비점오염원 (Nonpoint Pollution Source): 메릴랜드 연안만에서 비점오염원의 부하량이 크게 두가지로 분류되었다. 첫 째는 수계로 부터 지표면 유출에 의한 것으로 1990 메릴랜드 토지사용도 자료<sup>6)</sup>에 근거를 두고 산출되었다. 둘 째는 대기중으로 부터 수표면으로 퇴적에 의한 것으로 인근 Pokomoke 수역의 자료를 (Aqua Terra, 1991) 외삽하여 사용하였다. 자료에 의하면 퇴적물은 총인, 총질소가 0.0016 kg/hectare/day, 0.04 kg/hectare/day로 결정되었다.

점오염원 (Point Pollution Source): 두 곳의 점오염원으로 부터 대상수역으로 직접 방출되는 오염부하량이 산출되었다. Ocean Pines 하수처리장은 모델구간 수역번호 13에 위치하며 일일평균 총인, 총질소 방출량이 각각 2.94 kg/day, 3.87 kg/day이고, 모델구간 수역번호 19에 위치하는 Showell 축산농장으로 부터는 3.07 kg/day, 22.2 kg/day의 총인, 총질소가 방출된다.

침전물 산소요구량 (Sediment Oxygen Demand): 보정된 침전 퇴적물로 부터 수층으로 영양염 방출률이 Table 1에 요약되었다. 모델보정에 의하여 1.8 g/m<sup>2</sup>/day의 SOD가 산출되었다.

Table 1. Sediment Release Rates (mg/m<sup>2</sup>/day)

| Region                    | EUTRO5 Segments                | NH <sub>4</sub> | Ortho-P |
|---------------------------|--------------------------------|-----------------|---------|
| Inlet                     | 1,2,3                          | 0               | 0       |
| Isle of Wight Bay         | 4,5,8,9,10,11,23,24            | 12.5            | 2       |
| Turville Cr/St. Martin R. | 6,7,12,13,14,15,16,17,18,19,20 | 75              | 4       |
| Bishopville Prong         | 21,22                          | 120             | 8       |
| Assawoman Bay             | 25,26,27,29                    | 90              | 8       |
| Upper Assawoman Bay       | 28,30                          | 120             | 8       |

EUTRO5 반응계수: EUTRO5 모델에서 사용된 수층에서의 반응역학 계수들이 Table 2에 요약되었다. 이러한 상수들의 초기치는 Chesapeake Bay의 최근 부영양화 모델연구<sup>7)</sup>로 부터 얻어졌다.

Table 2. EUTRO5 Kinetic Coefficients

| <i>Constant</i>                                    | <i>Code</i> | <i>Value</i>                    |
|--|-------------|---------------------------------|
| Nitrification rate                                 | K12C        | 0.08 day <sup>-1</sup> at 20°C  |
| temperature coefficient                            | K12T        | 1.08                            |
| half-saturation constant                           | KN1T        | 0.00mg O <sub>2</sub> /L        |
| Denitrification rate                               | K20C        | 0.01 day <sup>-1</sup> at 20°C  |
| temperature coefficient                            | K20T        | 1.08                            |
| half-saturation constant                           | KNO3        | 0.00mg O <sub>2</sub> /L        |
| Saturated growth rate of phytoplankton             | K1C         | 2.03 day <sup>-1</sup> at 20°C  |
| temperature coefficient                            | K1T         | 1.06                            |
| Endogenous respiration rate of phytoplankton       | K1RC        | 0.125 day <sup>-1</sup> at 20°C |
| temperature coefficient                            | K1RT        | 1.045                           |
| Nonpredatory phytoplankton death rate              | K1D         | 0.02 day <sup>-1</sup> at 20°C  |
| Zooplankton grazing rate                           | K1G         | 1.0L/cell-day                   |
| Phytoplankton stoichiometry                        |             |                                 |
| oxygen-to-carbon ratio                             | OCRB        | 2.67mg O <sub>2</sub> /mg C     |
| carbon-to-chlorophyll ratio                        | CCHL        | 50mgC/mg chl a                  |
| phosphorus-to-carbon ratio                         | PCRB        | 0.025mgP/mgC                    |
| nitrogen-to-carbon ratio                           | NCRB        | 0.25mg N/mgC                    |
| Half-saturation constants for phytoplankton growth |             |                                 |
| carbon   | KMPHY       | 0.0mg C/L                       |
| nitrogen   | KMNG1       | 0.025mg N/L                     |
| phosphorus   | KMPG1       | 0.0001mg P/L                    |
| Nutrient limitation option                         | NUTLM       | 2=minimum                       |
| Light formulation switch                           | LGHTS       | 1=Di Toro                       |
| Saturation light intensity for phytoplankton       | IS1         | 350ly/day                       |
| BOD deoxygentation rate                            | KDC         | 0.07 day <sup>-1</sup> at 20°C  |
| temperature coefficient                            | KDT         | 1.05                            |
| half-saturation constant                           | KBOD        | 0.0 day <sup>-1</sup>           |
| Mideralization rate of dissolved org. N            | K71C        | 0.075 day <sup>-1</sup> at 20°C |
| temperature coefficient                            | K71T        | 1.08                            |
| Mineralization rate of dissolved org. P            | K83C        | 0.22 day <sup>-1</sup> at 20°C  |
| temperature coefficient                            | K83T        | 1.08                            |
| Phytoplankton settling velocity                    |             | 0.32m.day                       |
| Inorganics settling velocity                       |             | 0.27m/day                       |

### III. 결과 및 고찰

수질모델(EUTRO5)은 1983년과 1992년 여름의 현장 실측자료를 이용하여 각 수질인자에 적절하게 모델을 보정하였다. 현장에서 측정된 자료들이 평균치를 기준으로 최대 최소치를 상하한 선으로 표시되었다. BOD<sub>5</sub>, TKN, 암모니아, 질산/아질산염, 총인, 오르토인산염( $PO_4^{3-}$ ), 엽록소 a 그리고 용존산소 등의 주요 수질인자의 농도 분포가 Figure 2에 잘 나타나 있다. 그림과 같이 EUTRO5 모델은 조류의 생물량의 척도인 엽록소 a의 농도가 Bishopville Prong에서 St. Martin 강으로 내려가면서 감소되는 경향이 모델에 의하여 잘 반영되고 있다. 이외에도 하류 방향으로 영양염의 농도가 감소하는 경향도 모델에 의하여 잘 표현되고 있다. 모델분석에 의하면 Bishopville Prong과 같은 지류천에서 수심이 낮기 때문에 식물플랑크톤 (Phytoplanktin)의 성장은 수층에서의 침전율에 의해서 제한을 받는다. 반면에 Assawoman 또는 Asle of Wight 만 등에서는 수층에서 무기질소 농도가 낮기 때문에 질소가 식물성 플랑크톤의 성장에 제한요소로 작용한다.

### IV. 결론

매릴랜드 연안만은 수심이 비교적 얇고 잘 혼합되었으므로 수체의 흐름을 파악하기 위하여 수심평균 이차원 수리모델이 사용되었다. 흐름과 확산 등의 물질이동계수들을 결정하기 위하여 수리모델의 결과가 염도를 추적자 (tracer)로 사용한 질량운송 모델을 실행하기 위하여 사용되었다. 이 둘로 부터 얻어진 결과를 가지고 계절 정상상태 조건하에서 수질모델을 실행하였다. 모델결과에서 보듯이 수질모델은 조류와 영양염의 반응역학, 영양염의 순환과정 등의 퇴적층과 수층의 상호작용에 의한 영양염의 증감을 잘 반영하고 있다. 모델의 보정과 검증을 통하여 현재의 수질상태를 성공적으로 나타내었다. 그러므로 이 모델은 부영양화 문제에 대한 각각 소수계가 수층에 어떤 영향을 미치는 가를 파악하기 위하여 여러 가지의 시나리오에 의해서 평가할 수 있다. 또한, 향후 토지사용도의 변화가 수층에 미치는 영향도 예측할 수 있다.

## 참고문헌

1. **Boynton, W.R. et al.**, Maryland's Coastal Bays: An Assessment of Aquatic Systems, Pollutants Loadings, and Management Options, Submitted to Maryland Department of the Environment, Chesapeake Bay and Special Projects Branch, Baltimore, MD, 1993.
2. **Ambrose, Jr., R.B., T.A. Wool, J.P. Connolly, and R.W. Schanz**, WASP5, A Hydrodynamic and Water Quality Model Theory, User's Manual, and Programmer's Guide, Environmental Protection Agency, Athens, GA, 1991.
3. **Lung, W.S. and B.G. Hwang**, Water Quality Modeling of the St. Martin River, Assawoman and Isle of Wight Bays, Final Report to Maryland Department of the Environment, Baltimore, MD, 1994.
4. **Lung, W.S., J.L. Martin, and S.C. McCutcheon**, Eutrophication Analysis of Embayments in Prince William Sound, Alaska, *Journal of Environmental Engineering*, 119:811-824, 1993.
5. **Lung, W.S. and C.E. Larson**, Water Quality Modeling of Upper Mississippi River and Lake Pepin, *Journal of Environmental Engineering*, 121:691-699, 1995.
6. **Maryland Department of the Environment**, Nomination of Maryland's Coastal Bays to the National Estuary Program, MDE, Baltimore, MD, 1992.
7. **Cerco, C.F., and T. Cole**, Three-Dimensional Eutrophication Model of Chesapeake Bay, *Journal of Environmental Engineering*, 119:1006-1025, 1993.

## Watershed and EUTROS Segments

1 - EUTROS Segments

1 - Watershed Segments

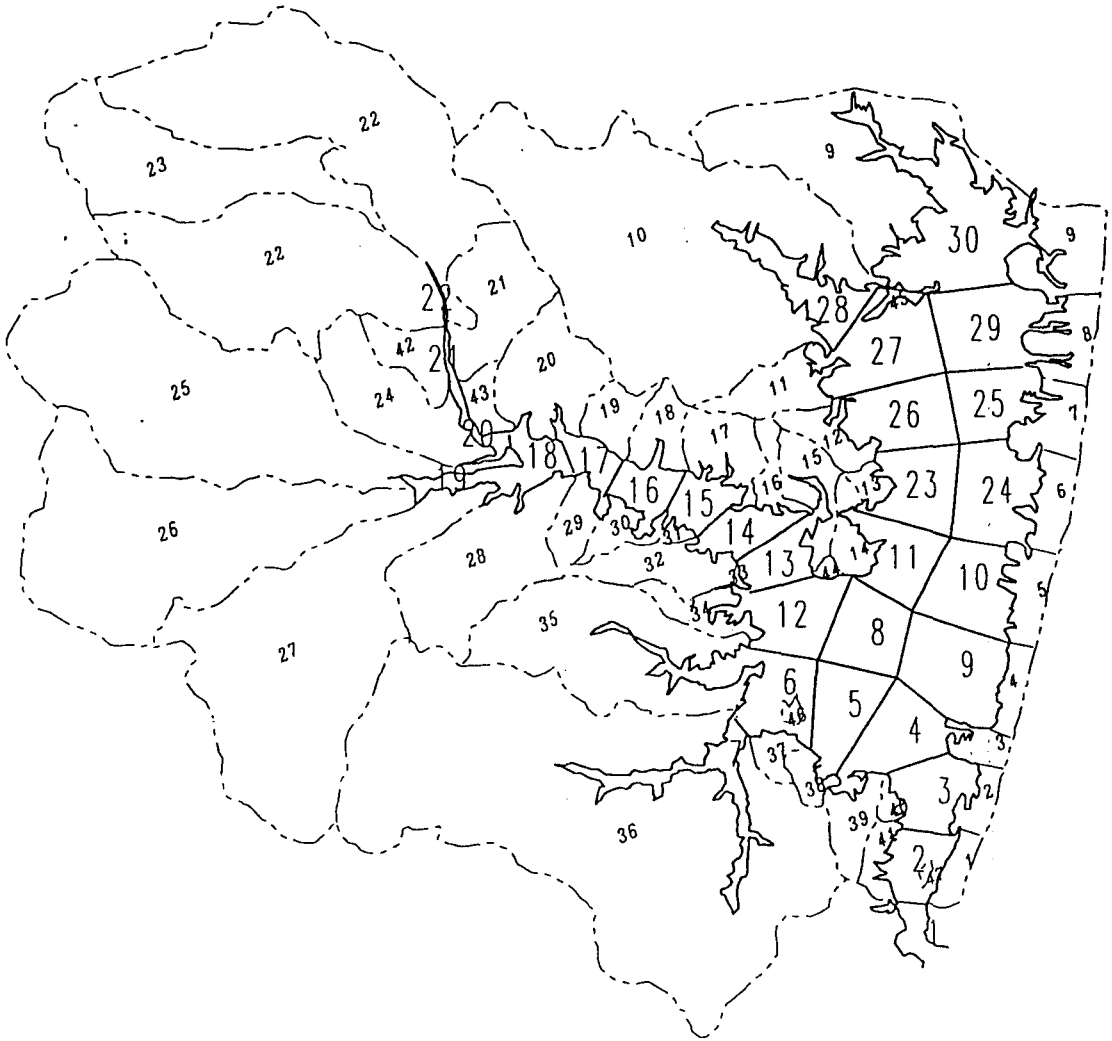


Figure 1. Watershed and Water Segments of the Study Area

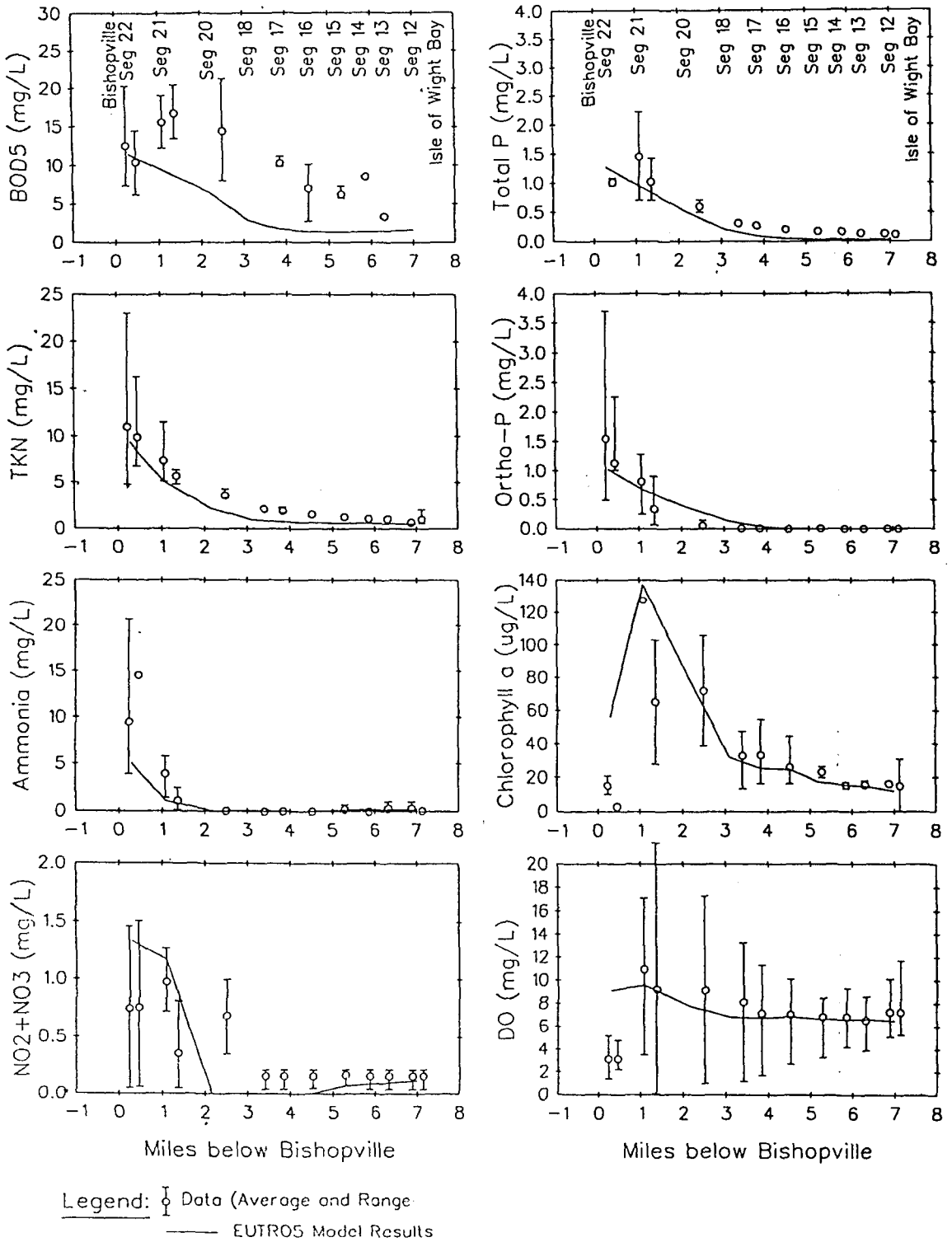


Figure 2. Model Results vs. Measured Water Quality Variables in St. Martin River