

# 河川 水質變動의 豫測을 위한 推計學的 水質解析 模型의 開發

## A Stochastic Model for the Prediction of Water Quality Variations in a River System

韓 健 淵\* · 金 上 鉉\*\* · 朴 在 弘\*\*\*

Han, Kun Yeun · Kim, Sang Hyun · Park, Jae Hong

### Abstract

A stochastic model "STO-RIV" for the prediction of water quality variation in a river system has been developed. Extended Streeter-Phelps equation and Monte Carlo simulation are used in the model. The model is applied to the reach of Waegwan to Mulkeum in the Nakdong River to compute the probability distribution of BOD and DO concentration at Mulkeum site. As the strategies to attain the goal of the water quality, some alternatives considering the treatment effect of the Keumho river are discussed using the stochastic model. Application of stochastic analysis to water quality management is strongly recommended in this country.

### 요 지

하천 수질변동의 예측을 위한 추계학적 모형 STO-RIV를 개발하였다. STO-RIV는 Streeter-Phelps 확장식의 해석적인 해와 Monte-Carlo 기법으로 구성하였다. 본 모형은 왜관에서 물굽에 이르는 낙동강 유역에 적용하여 장래의 물굽지점에서의 하천수질의 확률론적 특성이 정량적으로 계산될 수 있었다. 또한 금호강의 처리도 등을 고려한 여러가지의 수질관리 대안에 대한 수질변동 특성의 해석이 수행되었다. 본 STO-RIV모형은 수질 관련변수들의 변동성이 크게 나타나고 있는 국내하천 수질관리에 크게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 1. 序 論

하천에서의 水質變動 豫測을 위한 이제까지 대부

분의 해석이 모형에 사용된 각종 反應常數나 媒介變數의 變動性을 고려하지 않았고, 모형 계산치에 포함되어 있는 誤差에 대한 定量的인 해석을 실시하지 않은 상태인 確定論的인 값으로서 수질관리

\* 경북대학교 공과대학 부교수, 토목공학과  
\*\* 미국 Purdue 대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\* 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

대책을 수립하도록 구성되어 있다. 하천수질 관리를 위한 이러한 類型의 해석은 많은 경우에 있어서 그릇된 수질관리 대책을 제시할 수 있다. 즉, 再曝氣 係數의 약간의 변화가 溶存酸素 예측에 있어 큰 誤差를 유발할 수 있으며, 이것이 수질관리 대책의 수립시 投資費用 및 그 優先順位의 결정등에 있어 커다란 차이를 야기할 수 있게 된다. 하천에서의 수질변동 양상을 정확히 예측하기 위해서는 汚染源과 그 負荷量을 조사하여야 하고, 대상 유역에서의 水理, 水文學의 특성을 분석하여야 하며, 현재 및 장래의 수질변동의 특성을 確定論의 모형에 의하여 파악한 후, 目標 水質 基準를 달성하기 위하여 각종 汚染負荷를 規制하기 위한 效率의인 수질관리 대책을 推計學的 模型에 의하여 수립하여야 할 것이다. 특히, 洛東江 流域과 같은 경우 大邱, 龜尾, 金泉등에서의 대규모 汚染負荷가 琴湖江등의 지류를 통하여 本流로 유입되고 있으며, 下流部의 물금 및 남강 合流部에서는 많은 양의 물을 취수하여 釜山, 馬山, 昌原地域의 上水源水로 사용하고 있는 바, 하천에서의 適正水質 確保를 위한 효율적인 水質管理 기법의 개발이 절실히 요구되고 있다.

본 연구의 목적은 하천에서의 수질변동 예측을 위한 수리, 수문학적 특성을 해석하고, 確定論의 해석기법을 발전시켜 推計學的 模型을 통한 수질변동 특성의 예측 및 효율적인 수질관리 기법을 제시하여 그 適用性을 立證하는데 있다.

하천에서 수질해석을 위한 확정론적 모형의 표준적인 해석기법으로는 USGS의 Streeter-Phelps 모형(Bauer 등, 1979), WES의 STEADY모형(Martin, 1986), CE-QUAL-RIV1, US EPA의 QUAL2EU(Brown과 Barnwell, 1987)가 그 대표적인 모형들이다.

하천수질의 불확실성 해석을 위한 연구로서 Duke(1976)는 銳敏度 分析에 대하여 연구하여 이에 대한 표준적인 계산기법을 제시한바 있고, Walker(1982)는 1次 誤差解析 技法에 대하여 연구하여 入力變數가 出力變數에 미치는 寄與度를 統計學的 이론을 규명하였고, McDonnell등(1982)은 용존산소 모형의 불확실성 해석을 위하여 1次 誤差解析 技法을 적용하였다. Padgett(1977)는 하천에서 Streeter-Phelps방정식을 사용하여

BOD나 용존산소농도를 모형화 하였는데 여기서 BOD나 용존산소의 초기값을 위해 正規確率 分布로부터 任意 發生값을 사용하여 모형화하였다. Qaisi(1985)는 하천에서의 용존산소의 모형화를 위해 Monte Carlo 시뮬레이션을 실시했는데, 再曝氣 係數나 BOD 除去계수등은 正規分布를 사용해서 近似化하였다. Dewey(1984), Hornberger(1980)는 推計學的 模型링을 위한 入力 媒介變數의 변동성을 기술하였고 Tiwari와 Hobbie(1976), Ditoro(1984), Dewey(1984)는 Monte-Carlo 해석을 위하여 입력매개변수의 確率分布型에 관하여 연구하였다. 국내에서 하천수질에 관한 추계학적 모형에 의한 연구는 전무한 실정으로서 본 연구에서는 多樣한 水質 媒介變數의 변동성을 고려하여 하천의 특정 대상지점에 대한 수질변동 특성을 確率論的 分布에 의하여 제시할 수 있는 推計學的 模型을 개발하고, 이에 따른 水質管理技法을 제시하고자 한다.

## 2. 確定論的 河川 水質解析

수질관리를 위한 대상하천의 유량설정은 유역의 수문학적 특성에 따라 다르겠으나 미국등에서 사용하는 10년 빈도-7일 渴水量이나 국내에서 사용된 바 있는 渴水量, 低水量등을 대상 유량으로 하는 것은 수질관리 정책수립을 위한 計劃立案시 너무 過度한 費用負擔이 요구되어 그 實現性 與否가 제기 되기도 한다. 국내에서 조사된 하천유역의 수질특성이 월별로 그 자료가 정리 보관되고, 월별로 수질특성이 크게 차이를 보이는 것에 비추어 볼 때 10년 이상의 비교적 장기간 유량자료를 수집하고 이를 月別로 분석 처리하여 河川 本流 및 支流에 대하여 月別 平均流量과 最低流量을 구하고, 이를 기초로 확정론적 수질모형을 구성하는 것이 우리나라 유역특성에 적합한 것으로 사료된다.

이를 위하여 해당 유역에 대한 수문학적 자료를 조사 분석하여, 월별 평균 및 최저 유량등의 대상 유량이 산정되면 하천 수질해석의 수리학적 영향인자인 通水 斷面積, 流速, 徑深, 流量등은 連續方程式과 運動方程式을 이용하여 해석하였다.(한건연 등, 1994) 하천 수질해석을 위하여 널리 적용되고

있는 Streeter-Phelps식의 확장모형은 식(1)-(3)식과 같다.(한건연 등, 1994 ; Han 등, 1993)

$$\text{BOD} : L = L_0\alpha_3 + L_D\left(\frac{1-\alpha_3}{k_1+k_3}\right) \quad (1)$$

$$\text{NOD} : N = N_0\alpha_4 + N_D\left(\frac{1-\alpha_4}{k_4}\right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{DO} : C = & C_0\alpha_2 + C_5(1-\alpha_2) - k_1L_0\frac{\alpha_3-\alpha_2}{(k_2-(k_3+k_1))} \\ & - k_4N_0\frac{(\alpha_4-\alpha_2)}{(k_4-k_2)} + k_1L_D\frac{(\alpha_2-\alpha_3)}{(k_1+k_3)(k_1+k_3-k_2)} \\ & - k_1L_D\frac{(1-\alpha_2)}{k_2(k_1+k_3)} + N_D\frac{(\alpha_2-\alpha_4)}{(k_4+k_2)} - N_D\frac{(1-\alpha_2)}{k_2} \\ & - R\frac{(1-\alpha_2)}{k_4} + P(t)\frac{(1-\alpha_2)}{k_4} \quad (3) \end{aligned}$$

여기서,

$L_0, N_0, C_0$  : CBOD, NBOD, DO의 初期濃度

$L_D, N_D$  : 비점원 CBOD, NBOD 부하

$k_1, k_2, k_3, k_4$  : 탈산소계수, 재폭기계수, 침전 및  
흡착에 의한 제거율, NBOD제거율

$R, P$  : 조류에 의한 호흡율 및 광합성율

$$\alpha_2 = \text{Exp}\left(-k_2\frac{x}{U}\right)$$

$$\alpha_3 = \text{Exp}\left(-\frac{(k_1+k_3)x}{U}\right)$$

$$\alpha_4 = \text{Exp}\left(-k_4\frac{x}{U}\right)$$

하천수질의 확정론적 해석을 위해서는 많은 모형들이 개발되어 사용되고 있으나, 우리나라에서 적용하기에는 하천의 水理, 水文學의 특성의 相異性, 각종 反應係數들의 不充分 및 지역적 特殊 與件 등으로 많은 문제점들이 있는바, 본 연구에서는 추계학적 수질모형으로의 확장을 위하여 확정론적 수질 해석 모형 DET-RIV를 개발하였다. DET-RIV은 하천의 수리학적 不等流를 계산하기 위한 DET-RIVH와 Streeter-Phelps의 확장식의 계산을 위한 DET-RIVQ로 구성되어 있다.

확정론적 수질모형에 관한 이론 및 적용성 검토는 기 발표된 문헌(한건연 등, 1994 ; Han 등, 1993)에 구체적으로 기술되어 있다.

### 3. 推計學的 河川 水質解析

河川 水質解析을 위한 確定論的 模型은 언제나 誤差와 不確實性을 內包하게 되어 實際 自然 시스템에서의 모든 狀況을 完璧하게 再現하기는 어렵다. 自然 現象 自體에 內包되어 있는 本質的인 任意性이나 그 自然 現象을 數學的인 모형으로 간략화시키는 과정에서 複雜性이나 經濟性등의 이유등으로 計算되지 못한 부분들이 있게 된다. 즉 모형 개발 중 어떤 構成 成分을 無視하거나 부적절한 가정을 취함으로써 주어진 시스템을 記述하는데 부정확한 모형을 사용함으로써 얻어지는 成分, 모형에 쓰여지는 각종 係數나 負荷量, 初期條件등과 같이 모형에서의 불확실한 媒介變數에서 기인되는 성분 등이 그 예다.

#### 3.1 媒介變數의 確率分布 特性

모형에 사용되는 매개변수에는 負荷量이나 初期條件 등과 같이 통상 直接的인 관측에 의하여 결정될 수 있는 것과 脫酸素係數와 같이 현장이나 실험실에서의 관측을 통하여 결정될 수 있는 것이 있겠다. 또 다른 몇개의 係數들은 관련 變數들과의 獨立的인 測定을 통해 間接的으로 測定되어질 수도 있는데, 예를 들면 CBOD 除去係數나 NBOD 除去係數 등은 BOD 資料를 통해 推定되기도 한다. 나머지 다른 계수들은 文獻이나 시스템 反應資料의 검정 과정에서 결정되기도 한다. 이와 같은 과정은 이들 계수들에 있어서 다소의 부정확성이나 불확실성의 결과를 낳게 된다.

모형 媒介變數의 불확실성은 실제 시스템에 있어서의 環境條件의 自然的인 變動性에도 기인될 수 있다. 각 변수의 실제값은 때때로 일정한 범위 안에서 변화하게 된다. 이들 계수들의 불확실성은 모형의 계산에 따라 전파되어, 전체모형의 불확실성에도 기여한다. 그러므로, 확정론적 모형에서와 같이 모든 係數들에 대하여 하나의 확정론적 값을 사용하는 것 대신에 이들 媒介變數들의 변동성이나 불확실성을 고려하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 불확실한 매개변수들을 고려한 다양한 溶存酸素 모

형의 추계학적 해석이 요구되었다. 이들 변수들은 일정한 하나의 값 대신에 確率分布로 표현되는 模擬發生變數로 고려되었다.

본 연구에서는 다음 네가지 확률분포형을 기준으로 각 계수들에 대한 변동성을 고려하였다.

#### 가. 正規分布

確率變數의 평균값과 표준편차로 부터 식(4)와 같이 標本抽出할 수 있다.

$$X = \sigma_x \left[ \frac{12}{k} \right]^{1/2} \left[ \sum_{i=1}^k r_i - \frac{k}{2} \right] + \mu_x \quad (4)$$

여기서,  $r_i$ : 모의 발생난수      $\sigma_x$ : 표준편차  
 $X$ : 추출값                      $\mu_x$ : 산술평균  
 $k$ : 난수 발생횟수

#### 나. 對數正規分布

確率變數의 평균값과 표준편차로 부터 식(5)와 같이 標本抽出할 수 있다.

$$X = \text{Exp} \left( \mu_x + \sigma_x \left[ \frac{12}{k} \right]^{1/2} \left[ \sum_{i=1}^k r_i - \frac{k}{2} \right] \right) \quad (5)$$

#### 다. 三角形 分布

確率變數의 最大值 및 平均値와 最小値로 부터 식(6)이나 식(7)과 같이 標本抽出할 수 있다.

$$A = V3 - V1, \quad B = V2 - V3, \quad C = A / (A + B)$$

$C > r_i$  이면

$$X = V1 + \{r_i \times A \times (A + B)\}^{0.5} \quad (6)$$

$C > r_i$  이면

$$X = V2 - \{(1-r_i) \times (A + B) \times B\}^{0.5} \quad (7)$$

여기서,  $V2$ : 최대치    $V1$ : 최소치    $V3$ : 평균치

#### 라. 均等分布

確率變數의 最大值와 最小値로 부터 식(8)과 같이 標本抽出할 수 있다.

$$X = V1 + r_i \times (V2 - V1) \quad (8)$$

여기서,  $V2$ : 최대치    $V1$ : 최소치

### 3.2 Monte Carlo 解析技法

Monte Carlo 解析은 매개변수가 많이 포함되고, 그것에 대한 解析의인 解를 구하기가 不可能한 경우와 같은 복잡한 문제를 풀기 위하여 사용되는 任意 抽出에 의한 計算技法으로서 모형의 불확실성에 관한 여러가지 構成成分을 효과적으로 설명할 수 있는 기법이다. 이 기법에 있어 模型係數, 負荷量, 初期條件 등과 같은 불확실한 매개변수의 임의의 값이 이들 매개변수의 변동성을 나타내는 獨立의인 確率分布로 부터 발생하게 된다. 매개변수의 평균치는 직접적인 관측이나 실험결과치로 부터 독립적으로 결정된다고 가정하였다. 또한 이런 것들은 관련된 변수들의 野外實測을 통하여 추정될 수도 있고 몇개의 매개변수에 대한 평균치는 관련문헌에서 부터 결정될 수 있겠다. 이들 분포의 표준편차는 매개변수의 평균치의 %로 주어질 수도 있다. 이후에는 任意 抽出過程을 통하여 각기 생성된 媒介變數値가 모형으로 치환된다. 이러한 추출과정을 수백번 반복함으로써 Monte Carlo 기법은 많은 모형예측치와 이에 수반된 불확실성을 계산한다. 이 과정은 매개변수들의 상호간의 어떤 작용을 일으키지 않는 독립적으로 변화한다는 가정에 근거하고 있다. 즉, 각 매개변수에서의 변동이 다른 모든 매개변수에서의 변동과는 獨立的으로 발생한다는 것이다. 예를 들어, DO 모형에 있어 BOD 汚染負荷의 變動性이 하천의 再曝氣係數나 모형내의 다른 어떤 매개변수의 변동성과는 관련이 없다고 가정한다.

亂數의 발생은 식(9), (10)과 같은 multiplicative congruential generator를 이용하였다.

$$X_{i+1} = a X_i \pmod{m} \quad (9)$$

$$U_i = \frac{X_i}{m} \quad (10)$$

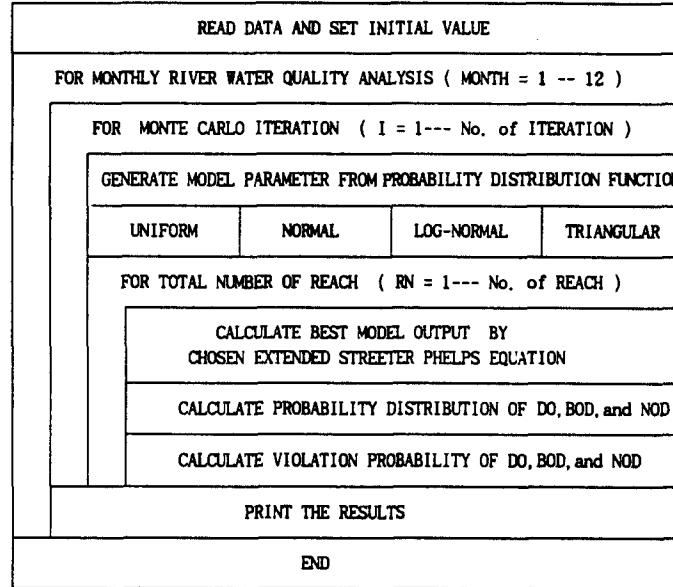


그림 1. 추계학적 수질모형의 계산흐름도

여기서,  $a=16807$ ,  $m=2^{31}-1$ ,  $X_i$ 은 均等亂數를 발생시키기 위한 초기값,  $U_i$ 는 均等分布에 의한 亂數값, mod는 modulus의 약자를 나타내고 있다.

### 3.3 推計學的 水質模型 STO-RIV의 開發

기존의 수질해석 연구는 주로 하천에서의 濁水量에 대한 수질해석이 중심이 되었으나 이는 環境投資效果面에서 達成與否가 큰 문제가 되었던 바, 본 연구에서는 국내 하천의 水質變化特性이 月別水文條件과 水溫등에 따라 큰 차이를 보이고 있는 점을 고려하여 月別로 水質解析을 실시할 수 있도록 프로그램을 구성하였다. 본 연구에서는 多數의 汚染負荷條件에 대한 하천 시스템의 反應을 임의의 수개 지점에서 確率論的인 水質分布特性을 계산할 수 있도록 일반화 시켰다.

이를 위하여 Monte Carlo 기법을 사용하여 推計學的 水質解析을 수행하고 特定關心地域의 DO, CBOD 및 NBOD濃度의 確率分布와 環境水質基準의 위반확률(violation probability) 등을 계산하는 推計學的 水質模型 STO-RIV를 개발하였다. STO-RIV는 Fortran-77으로 구성되어 있고, 그림 1은 추계학적 수질모형 STO-RIV의 계산흐름도를 표시한 것이다.

### 4. 推計學的 模型에 의한 水質管理 技法

본 연구에서 적용하고자 하는 낙동강유역의 왜관-물금의 하도구간은 대구, 구미, 김천, 왜관등의 대도시와 공단에서 대규모 오염부하가 직접 또는 금호강등의 支流를 통하여 本流로 流入되고 있고, 下流部의 물금 및 남강 合流部에서는 多量의 河川水가 上水源水로 사용되고 있어 효율적인 수질관리 대책의 수립을 위해서 확정론적 및 추계학적 수질관리기법의 도입이 필요한 유역으로 사료되었다.

적용대상 區間은 금호강, 남강, 밀양강 등을 주요 오염원을 가진 支流로 포함하는 왜관에서 물금에 이르는 167.8km를 선정하였다. 낙동강 유역은 최근 10여년 동안 안동댐의 건설(1972-1976), 낙동강하구연 (1987), 영천댐(1980), 합천댐(1988) 등의 준공 및 유역내의 都市化 地域의 增大등으로 인하여 이 區間내의 하천 유량은 큰 변화를 갖게 되었다. 특히 上流部의 流量 供給源이었던 안동댐 준공의 영향은 지대할 것으로 보고 안동댐 준공이 후에서부터 최근까지인 1977-1989까지의 13년간의 水文資料를 기초로하여 하천유량을 분석하였다.

우리나라 하천유역의 수문학적 특성이 월별로 뚜렷하게 구분되고 이에 따른 수질의 특성도 월별로

상이하게 나타나는 바, 본 연구에서는 최근 13년간 월별 평균유량과 최소유량을 산정하고 이를 기초로 수질해석을 실시하였다. 월별 평균유량의 산정은 水文調査年報에서 월 평균 수위를 유량으로 환산하여 평균하였는데, 자료의 신빙성 문제에 비교적 그 信賴度가 높다고 판단된 왜관, 적포교, 진동, 삼랑진지점의 수위자료를 유역면적 및 유로연장에 대하여 回歸分析하여 각 合流點別 유량을 산정하였다(한건연, 1992).

주요 합류점별 유량자료를 기초로 하고 하도의 幾何學的 断面資料(낙동강 하천정비 기본계획, 1981, 1983)를 정리하여 수리학적 계산방법에 의하여 不等流 解析을 실시하였다. 조사된 하도단면은 164개 단면을 취하였는데 이 區間의 平均河狀 傾斜은 약 0.00021이었고 Manning의 조도계수는 0.030을 이용하였다. 부등류 해석은 월별 평균유량 및 최저유량에 대하여 실시되었다.

오염원 자료는 관련기관의 報告書(낙동강 유역

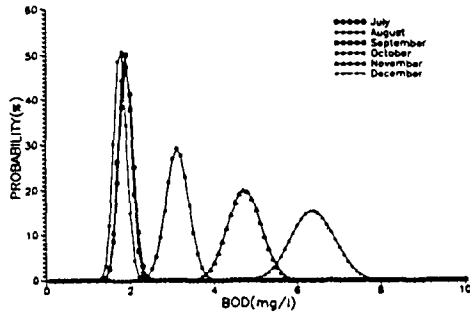


그림 2. 1996년 BOD의 확률분포도(1월-6월, 평균유량)

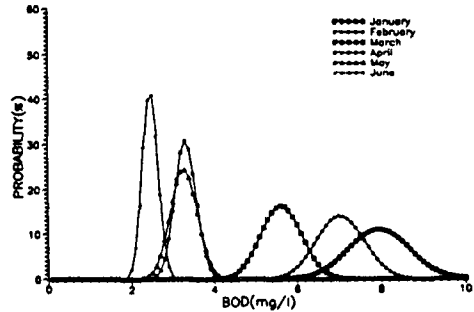


그림 3. 1996년 BOD의 확률분포도(7월-12월, 평균유량)

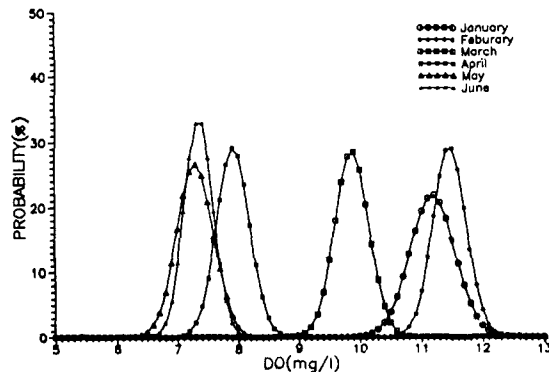


그림 4. 1996년 DO의 확률분포도(1월-6월, 평균유량)

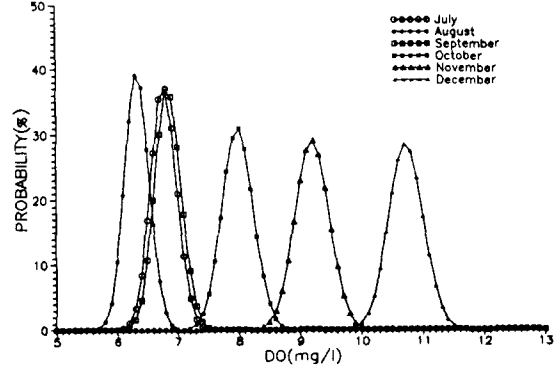


그림 5. 1996년 DO의 확률분포도(7월-12월, 평균유량)

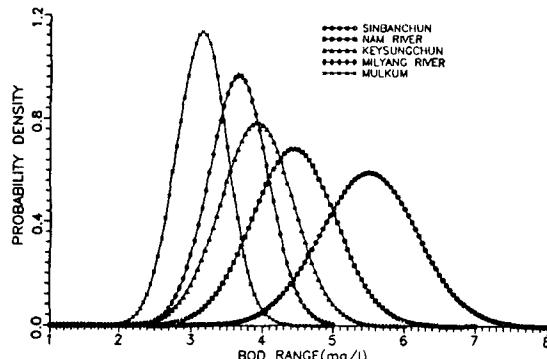


그림 6. 구간별 BOD의 확률밀도분포도

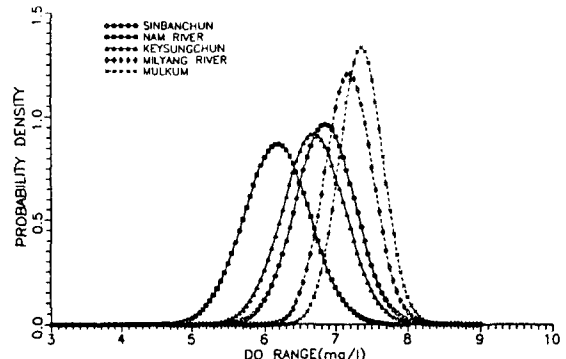


그림 7. 구간별 DO의 확률밀도분포도

환경보전 종합계획 사업, 1985)로 부터 수집하였다. 추계학적 수질해석에 앞서 낙동강 수질의 전반적인 상황을 考察하고 추계학적 수질해석 결과와의 檢證을 위하여 확정론적 수질해석을 실시하였다. 확정론적 모형의 적용에 대한 구체적인 설명은 기 발표된 문헌(한건연 등, 1992; 한건연 등, 1994; Han 등, 1993)에 기술되어 있다.

#### 4.1 推計學的 水質變動 特性解析

下流部 물금 취수장 지점에서의 하천수질에 대한 推計學的 特性을 분석하였다. 국내에서 아직 수질해석에 필요한 媒介變數들의 統計學的 特性에 대한 자료는 미비한 실정으로서 相關문헌을 통하여 조사된 자료를 참고로 하였다.(Qaisi, 1985) 이들중 중요변수인 流量, 流速, 汚染負荷量, 水溫 및 反應常數에 대하여 正規分布로 고려하고 표준편차는 각각 평균값의  $\pm(10\sim 20)\%$  범위에서부터 발생시킨 亂數를 이용하여 이를 본 연구에서 개발한 모형에 의하여 해석하였다.

Monte Carlo의 반복계산회수는 100번, 200번, 300번에 대하여 실시하였는데, 각 시뮬레이션에서는 모형 내에서 다양한 媒介變數에 대한 變動特性을 고려한 새로운 값들이 주어진 分布型에 의하여 선정되고 이것이 模型方程式에 치환되어 BOD 및 DO의 값을 계산하도록 구성되어 있다. BOD와 DO에 대한 推計學的 解析 結果値와 確定論的 解析 結果値는 推計學的 解析시 반복계산회수 N 값이 증가 될수록 確定論的 解析 結果치와 근접하고 있는 것으로 나타나고 있다.<sup>6)</sup> 특히 N값이 300번 이상일 경우에는 추계학적 해가 安定解에 도달한 것으로 판단되었고 따라서 본 연구의 모든 계산은  $N=300$ 으로 하여 수행하였다. 계산시간은 300회 反復計算일 경우 연도별 (12개월), 유량등급별로 PC 486 DX-33 system 에서 약 40분 정도가 소요되었다.

그림 2, 3은 1996년의 월 평균유량에 대한 물금 시점에서의 BOD의 確率分布를 도시한 것이고, 그림 4, 5는 溶存酸素에 대한 確率分布를 도시한 것이다. 그림에서 보는바와 같이 월별 BOD 및 DO의 確率分布가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있고

BOD의 경우 1-2월의 渴水時期에 水質分布가 악화된 분포양상을 보이고 있고 DO의 경우 5-6월의 夏節期에 수질분포가 나쁜 것으로 나타났다. 이는 洪水期 이전의 河川流量의 減少와 水溫이 높음으로 인하여 DO의 飽和濃度가 낮게 나타남에 기인하는 것으로 사료되었다. 전반적으로 볼때 年中 月別水質의 變動狀況을 살펴 보면 夏節期에는 DO가 冬節期 및 渴水期에는 BOD가 문제가 되는것을 관찰할 수 있었고 월별 자료로부터 水質基準의 違反確率 程度를 圖示 結果로부터 손쉽게 확인할 수 있었다.

#### 4.2 比較檢討

그림 6, 7은 1996년 6월 평균유량인 경우 각 구간별로 BOD 및 DO의 確率密度分布를 도시한 것인데, 그림에서 보는 바와 같이 下流로 진행할수록 하천의 자정작용에 따라 수질이 개선함을 알 수 있었고 上流部의 水質 變動 要素들의 영향이 상대적으로 감소하는 경향을 관찰할 수 있었다.

그림 8, 9는 1986년 6월 평균유량의 경우 유량의 確率分布型을 正規分布, 對數正規分布, 三角形分布, 均等分布 등의 4가지 分布型으로 변화시켜가며 계산된 결과를 비교함으로써 수질과 관련된 계수의 確率分布型에 따라 下流部에서의 敏感度 解析을 수행한 것이다. 正規分布와 對數正規分布의 경우 標準偏差는 각각 평균값의 20%를 고려하였고 均等分布 및 三角形分布의 最大值와 最小値를 標準偏差의 3배로 고려하여 하류부 물금지점에서 수질 변동 특성을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 상류부의 유량의 確率分布型의 선정에 따른 하류부에서의 수질영향은 비교적 작게 나타나는 것을 확인할 수 있었는데 이는 單純模型에서의 檢定過程에서도 검토할 수 있었는데, 이는 하천수질 모형을 구성하고 있는 Streeter-Phelps 확장식이 지수함수(exponential function) 형태로 나타나고 있는 영향임을 확인하였다(한건연, 1992; 한건연 등, 1993).

Monte Carlo해석에 의한 推計學的 解析結果이 제까지의 확정론적 모형에는 제시하기 어려웠던 河川水質의 確率論的 特性이 定量的으로 계산될 수

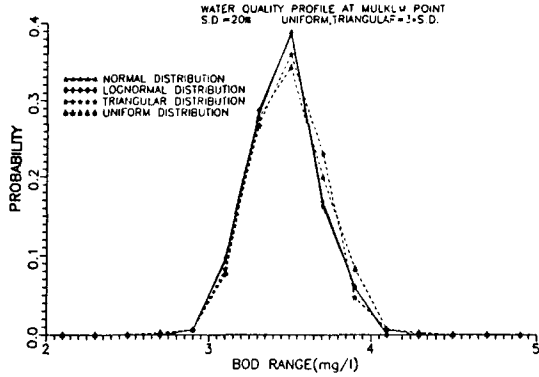


그림 8. 유량의 변동성에 따른 BOD의 확률분포도

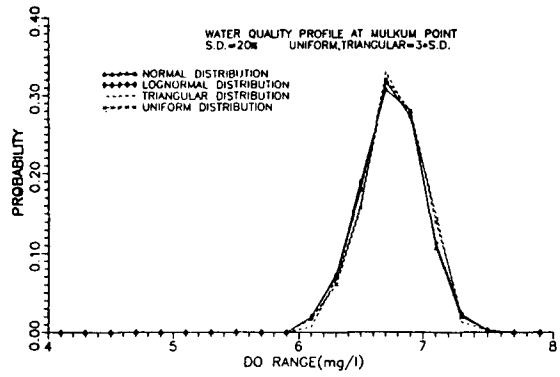


그림 9. 유량의 변동에 따른 DO의 확률분포도

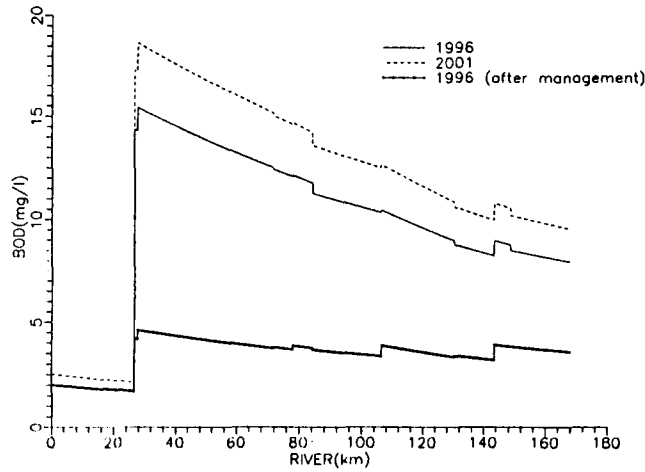


그림 10. 장래 BOD의 종단형상(1월, 평균유량)

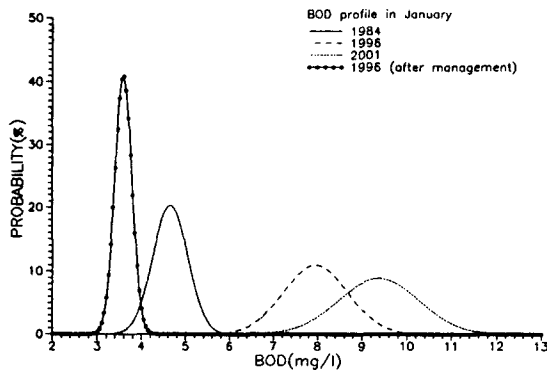


그림 11. 년도별 BOD 확률분포도(1월, 평균유량)

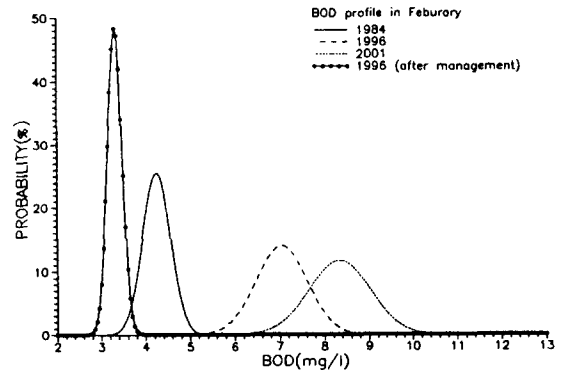


그림 12. 년도별 BOD 확률분포도(2월, 평균유량)



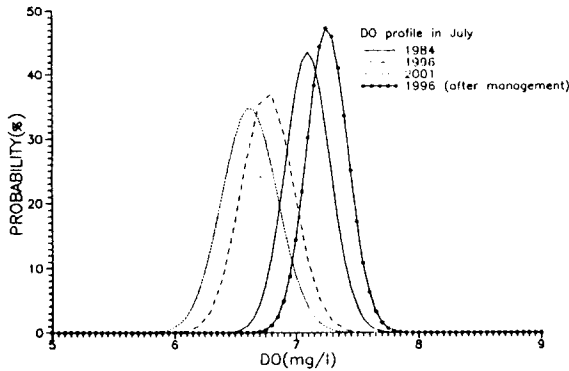


그림 13. 년도별 DO확률분포도(7월, 평균유량)

있었고 이를 통하여 추계학적 수질변동 특성의 예측이 가능하게 되었다. 다양한 汚染削減 計劃에 따른 수질관리계획의 분야에 적용된다면 국내 하천유역에서 그 활용성이 크게 기대될 것으로 판단되었다.

#### 4.3 水質管理技法의 提示

낙동강 유역(왜관-물금구간)에서 물금취수장의 적정수질 확보는 이 유역에서 가장 큰 오염원인 금호강으로 부터의 처리도에 따라 크게 좌우될 수 있겠다. 금호강 중권역 수질보전 계획(1992)에 따르면 금호강 및 진천천의 오염부하는 이 유역에서의 下水處理場 건설에 의하여 1996년 이후 각각 19504kg/day, 3257kg/day로 각각 크게 감소될 것으로 나타나 이에 대한 효과를 중심으로 검토하고자 한다. 그림 10은 1996년, 2001년의 대책전과 1996년 대책후의 BOD 최악의 달인 1월 평균유량에 대하여 확률론적 모형에 의한 BOD의 종단형상을 표시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 BOD負荷量의 削減으로 인한 영향이 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있어 수질 개선 효과를 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발한 推計學的 模型을 이용하여 물금지점을 중심으로 한 水質變動 特性을 해석하였다. BOD의 확률분포는 모든 월에 대하여 1mg/l를 상회하고 있었으며, BOD 3mg/l를 상회하는 달은 1, 2, 12월로 나타났다. DO의 경우 모든 월에 대하여 6mg/l를 상회하고 있는 것으로 나타났으나 9

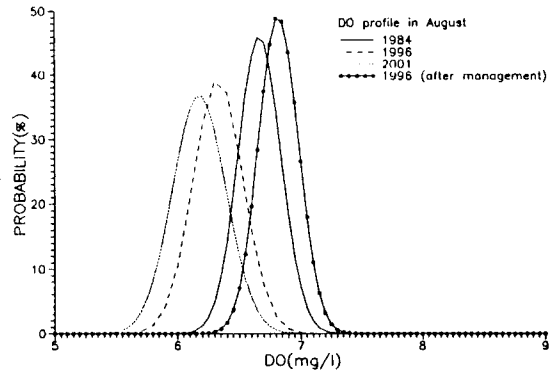


그림 14. 년도별 DO확률분포도(8월, 평균유량)

월의 경우에는 7.5mg/l 이하의 수질을 나타냈다. 그림 11-그림 14는 1984년, 1996년, 2001년 대책전과 1996년 대책후의 BOD가 나쁘게 나타난 1,2월 평균유량과 DO가 나쁘게 나타난 7, 8월 평균유량에 대한 BOD와 DO의 수질변동 특성을 표시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 汚染負荷削減에 따른 수질 개선 효과의 확률분포 특성이 뚜렷하게 나타나 있다. 그림으로 부터 DO 또는 BOD 값이 어떤 수질기준에 위배되는 確率을 결정할 수 있겠고 최소 DO 및 최대 BOD 기준치를 위반하는 확률이 이 분포로 부터 결정할 수 있는바, 이를 통하여 하천수질의 변동 특성이 합리적으로 고려된 수질관리 대책의 수립 및 이에 따른 費用 投資등에 優先順位가 효과적으로 고려될 수 있겠다.

본 연구는 추계학적 모형의 개발과 그 방법론의 제시에 주목적을 둔 것으로서 앞으로 수질개변수의 다양한 변동특성 자료를 꾸준히 수집분석하여 본 추계학적 모형에 대한 正確한 入力資料로 활용한다면 실제 하천에서 발생할 수 있는 상황을 信賴性을 높여 再現할 수 있을 것으로 사료되었다.

## 5. 結 論

1. 河川水質의 變動豫測을 위한 모형으로서 Streeter-Phelps의 확장식과 Monte-Carlo기법을 기초로 하여 推計學的 水質模型 STO-RIV를 개발하였다. STO-RIV에서는 모형 매개변수의 변동성을 고려하기 위한 亂數發生을 위하여 正規分布, 對數正規分布, 三角形分布, 均等分布의 네가지 確率

分布를 활용하였고, 水質 基準에 적합한 汚染負荷量의 處理效率과 適正 河川流量과의 관계를 산정할 수 있도록 구성되어 있다.

2. 推計學的 解析 模型을 이용하여 하류부 물금 지점에서 현재 및 장래에 있어서의 BOD 및 DO의 確率分布를 계산하였으며, 계산결과에 의하면 하절기에는 DO가 문제가 되며 동절기 및 갈수기에는 BOD가 문제가 됨을 확인하였고, 이에 대한 적절한 水質 管理 方案을 제시하였다.

3. Monte Carlo 해석을 통하여 부하량 변동에 따른 水質 改善 效果를 效率的으로 검토하였다. 특히, 廢水 및 糞尿處理場에서의 放流量과 汚染負荷量, 各種 反應係數, 河川流量 및 流速등의 變動性이 심한 國內 河川에서의 水資源의 효율적인 관리를 위해서는 본 연구에서의 推計學的 模型을 통한 水質管理가 반드시 수반되어야 할 것으로 판단되었다.

### 감사의 글

본 연구는 1992년도 국제수문개발계획 (IHP) 사업의 일환으로 수행되었으며, 이를 지원한 건설부에 감사를 표합니다.

### 參 考 文 獻

한국수문조사연보. (1977-1989). 건설부.  
 낙동강 하천정비 기본계획(보완조사 I). (1981). 건설부.  
 낙동강 하천정비 기본계획(보완조사 II). (1983). 건설부.  
 금호강 중역권 수질보존계획(안). (1992). 대구지방환경청.  
 낙동강 상류중역권 수질보존계획(안). (1992). 대구지방환경청.  
 한건연 (1992). "하천수질의 변동예측을 위한 체계화적 수질해석 모형의 개발." 국제수문개발계획 연구보고서, 건설부, pp. 6.1-6.105.  
 한건연 등 (1994). "낙동강 중류부에서의 확정론적 수질해석". 한국수문학회지, 제 27 권, 제 1 호, pp. 53-67.

한건연 등 (1993). "하천수질에 관한 불확실도 해석의 필요성." 제35회 수공학연구발표회 논문집, 한국수문학회, pp. 343-350.  
 낙동강유역 환경보전 종합계획사업(수질부문). (1985). 환경청.  
 Bauer, D.P., Jennings, M.E., and Miller, J.E. (1979). "One-dimensional steady state stream water quality model." *Water Resources Investigation 79-45*, US Geological Survey.  
 Bowie, G.L., et al. (1985). "Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling." 2nd Ed., *EPA/600/3-85/040*, US EPA.  
 Brown, L.C., and Barnwell, T.O. (1987). "Computer program documentation for the enhanced stream water quality model QUAL2E-UNCAS." *EPA/600/3-87/007*, US EPA.  
 Dewey, R.J. (1984). "Application of stochastic dissolved oxygen model." *J. of Env. Eng. Div.*, ASCE, Vol. 110, No. 2, pp. 412-429.  
 Ditoro, D.M. (1984). "Probability model of stream quality due to runoff." *J. of Env. Eng. Div.*, ASCE, Vol. 110, No. 3, pp. 607-628.  
 Duke, J.H. (1973). "Provision of a steady state version of the stream model, QUAL." *Water Resources Engineers*.  
 Han, Kun-Yeun et al. (1993). "Water quality management using deterministic and stochastic models in the Nakdong River", Paper No. D-7-1, *Proc. of IAHR*, Tokyo, Japan, pp. 203-210.  
 Hornberger, G.M. (1980). "Uncertainty in dissolved oxygen prediction due to variability in algal photosynthesis." *Water Research*, Vol. 14, pp. 355-361.  
 Martin, J.L. (1986). "Simplified, steady state temperature and dissolved oxygen model, User's Guide." *Instruction Report E-86-4*, US Army Engineer Waterways Experiment Station.  
 Padgett, W.J., et al. (1977). "A random differential equation approach to the probability distribution of BOD and DO in streams." *J. of Applied Mathematics*, Vol. 32, No. 2, pp. 467-

483.

- Qaisi, K. (1985). "Uncertainty analysis of stream dissolved oxygen model." PhD dissertation, Univ. of Michigan.
- Tiwari, J.L., and Hobbie, J.E. (1976). "Random differential equations as models of ecosystems Monte Carlo Simulation Approach." *Math Biosci*, pp. 25-44.
- Walker, W.W. (1982). "A Sensitivity and error analysis framework for lake eutrophication modeling." *Water Resources Bulletin*, Vol. 18, No. 1, pp. 53-60.