

〈論 文〉

洛東江 中流部에서의 確定論的 水質解析 Deterministic Water Quality Analysis in the Midstream of the Nakdong River

韓 健 淵*, 李 正 植**, 金 上 鉉***, 金 弘 泰****
HAN, Kun Yeun, LEE, Jung Sik, KIM, Sang Hyun and KIM, Hong Tae

Abstract □ Water quality analysis in the midstream of the Nakdong river is studied. Deterministic model RQ1 which contains two code, RQ1-1 for hydrologic and hydraulic analysis and RQ1-2 for water quality analysis are developed. Monthly mean and minimum discharges in the basin (from Waegwan to Jindong) are estimated. A varied flow analysis is performed based on the geometric data of channel and RQ1-1 model. The maximum concentration of BOD and minimum concentration of DO are occurred at the confluence of Keumho river and immediately downstream of Hyunpoong, respectively. The computed concentrations of BOD at several points have good agreements with observed data. Maximum allowable BOD loads from the Keumho River are provided to attain the goal of water quality in the basin.

요 지 : 洛東江 中流部에서의 수질해석을 위한 確定論的 水質模型을 개발하였으며 확정론적 수질해석 모형 RQ1은 水理, 水文學的 解析을 위한 RQ1-1과 水質解析을 위한 RQ1-2로 구성되어 있다. 낙동강 중류부의 수질해석을 위하여 왜관에서 진동에 이르는 이 구역의 월별 평균유량과 최소유량을 산정하였고 河道斷面의 幾何學的 特性을 기초로 하여 不等流解析을 실시하므로써 수질해석에 필요한 수리학적 특성치를 계산하였다. 확정론적 수질해석모형에 의한 수질해석 결과 BOD의 最大地點은 琴湖江 合流點 또는 진천천 合流點, DO의 최소 지점은 玄風하류부로 나타났다. 수질모형에 의한 계산결과치는 수개지점에서의 실측치와 합리적인 범위내에서 일치되고 있었으며 이 구역에서 目標水質에 도달하기 위한 금호강에서의 최대 BOD 허용부하량을 산정하여 제시하였다.

1. 序 論

최근에 들어 인구의 증가와 도시집중, 산업의 발전은 필연적으로 용수수요의 격증을 초래하게 되었으며 이와 수반된 하천수의 수질문제는 중요한 사회문제로 대두되고 있다. 특히 대구지역을 유하하는 금호강은 오염이 심한 하천으로서 낙동강 중류부에서 수질저하를 야기하여 구역의 수자원수질 관리에 큰 어려움을 겪고 있다. 낙동강 중류부의 경우 금호강 및 낙동강 수개 지점에 대한 수질조사

및 분석은 관련기관에서 계속 수행되고 있으나 종합적인 최적의 수질관리 대책은 아직까지 미흡하다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 금호강을 주요 오염원으로 포함하고 있는 왜관에서 진동에 이르는 낙동강 중류부에 대한 수리, 수문특성 자료 및 오염원 자료를 수집 분석하고 溶存酸素量(DO), 生物化學的 酸素要求量(BOD), 窒素性 酸素要求量(NOD) 등을 주요 汚染指標因子로 하는 1次元 水質解析 模型을 개발하였다. 또한 이를 적용하여 將來水質을 예측하고, 이 구역에 적합한 水質管理 技法을 檢討

* 경북대학교 공과대학 토목공학과 부교수
** 금오공과대학 토목공학과 부교수
*** 미국 Purdue 대학교 대학원 토목공학과 박사과정
**** 경북대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

하였다.

하천에서의 효율적인 수질관리를 위해서는 오염원을 조사하여 오염부하량을 분석하여야 하고, 하도 구간에서의 수리, 수문특성을 조사 분석하여 하도내에서 흐름해석을 실시하여야 하며, 오염물 배출이 하천 수질에 미치는 영향을 확정론적 수질해석 모형 기법으로 해석하고 이를 실측치와 비교하여 최적의 수질관리 대책을 수립하여야 한다.

하천에서 수질해석을 위한 수학적 모형은 Streeter-Phelps(1923)가 최초로 하수처리장으로부터 방류되는 오염물에 대한 自淨能力을 評價하기 위하여 유도되었다. 단순한 1次 反應과 沈澱項을 갖는 定常狀態의 DO와 BOD에 대한 1차원적 해석은 Gromiec, Loucks 와 Orlob (1983) 등에 의하여 유도된 바 있다. 정상상태의 해석적인 모형의 전산화는 하천시스템에서 수질을 시뮬레이션 할 수 있는데 美國 地質調查局(USGS)의 Streeter-Phelps모형 (Bauer, Jennings 와 Miller, 1979)과 美國 陸軍工兵團(Corps of Engineers)의 STEADY 모형 (Martin, 1986)은 하천수계에 대한 정상상태의 해를 계산하는 해석적인 모형의 예이다. STEADY 모형은 수온, DO, BOD를 모델링하고 USGS의 Streeter-Phelps 모형은 수온, DO, CBOD 이외에도 NBOD, 인산염, 대장균군, 3가지 보존성 물질등을 계산 할 수 있다.

해석적인 해를 용이하게 하였던 가정들이 부적절하게 되거나, 관련되는 식의 복잡성으로 인하여 해석적인 해가 존재하지 않는 경우에는 수치적인 수질모형에 의존하는 것이 필요하게 된다. 數值的인 水質解析 模型으로서의 定常狀態 模型과 動力學的 模型이 있는데 각각 美國 環境廳의 QUAL2E (1987)와 美國 工兵團의 CE-QUAL-RIV1 (1990)이 그 대표적인 모형들이다.

QUAL2E는 수치해석적 1차원 수질 모형으로서 수리학적 정상상태의 흐름조건 (수리학적 조건)을 가정하고 있으나 수질인자는 定常狀態 또는 日中 水質變化 樣相등의 動力學的 狀態의 시뮬레이션이 가능하다. 이 모형은 15개의 수질인자를 시뮬레이션 할수 있다. QUAL2E는 널리 보급되어 사용하고 있으며 하천 시스템에 대하여 標準的으로 구성된 수질모형이다. CE-QUAL-RIV1은 수리해

석을 위한 RIV1H와 수질해석을 위한 RIV1Q로 구성되어 있다. RIV1H는 비선형 Saint Venant 식을 Preissmann scheme에 의하여 차분화 하고 Newton-Raphson 방법에 의하여 非線形式을 풀어가는 動力學的 模型이고, RIV1Q는 수질인자의 質量保存 方程式을 풀기 위하여 explicit 형 有限差分 方程式을 이용하게 된다. 이 모형에서 수온, DO, CBOD, nutrient kinetics 등을 모형화 하는 기법은 QUAL2E와 유사하다.

국내에서 이 분야에 대한 연구는 기존에 개발된 수질모형의 적용을 중심으로 진행되어 왔다. 한국 과학기술원(1981, 1982)에서는 WQRRS 모형과 QUAL-II 모형의 국내 유역에 대한 적용성을 검토하였고 건설기술연구원(1987, 1988)에서는 QUAL-II 모형에 대한 반응계수의 예민도 분석을 실시하고 이의 개선방안을 제시하였다. 이홍근과 한진석(1984)은 낙동강 중류부에서의 하천자정능력에 대한 평가를 실시하였고, 한건연(1981, 1984)은 QUAL-II 모형을 한강유역에 적용하였으며 이 모형의 국내하천에 대한 적용시 문제점을 지적하였고, 최홍식과 이길성(1987)은 QUAL-II 모형을 금강유역에 적용하여 해석하였다. 기존에 선진국에서 개발된 하천 수질해석을 위한 여러가지 모형들은 각기 대상하천 유역에 적합하도록 입력자료 및 프로그램이 구성되어 있으므로 입력자료로서의 水理, 水文學的 特性值들의 不完全性 및 各種 反應係數의 획득 여부등 국내 研究對象 流域에 적합하지 못한 경우가 많다. 따라서, 낙동강 중류부 유역에 적합하도록 구성된 確定論的 模型과 이를 擴張發展 하게될 推計學的 模型의 開發은 매우 긴요하며 이를 기초로 한 연구기법은 국내의 다른하천 유역에 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 確定論的 水質解析 模型

확정론적 수질해석모형을 구성하기 위해서는 대상하천의 수문특성이 규명되어야 하고 이를 기초로 수질해석에 필요한 수리학적 인자인 하도구간내에서의 流速, 通水斷面積, 徑深, 流量 등의 자료가 계산되어야 한다. 국내에서 조사된 하천유역의 수질

특성이 월별로 그 자료가 정리 보관되고, 월별로 水質特性이 크게 차이를 보이는 것에 비추어 볼때 10년 이상의 비교적 長期間 유량자료를 수집하고 이를 月別로 分析 處理하여 月別 平均流量과 月別 最小流量을 구하고, 이를 기초로 확정론적 수질모형을 구성하는 것이 우리나라 流域特性에 適合한 것으로 사료되었다.

2.1. 河川 水理解析

해당 유역에 대한 수문학적 자료를 조사 분석하여, 월별 평균 및 최소 유량등의 대상 유량이 산정되면 하천 수질해석의 수리학적 영향인자인 통수단면적, 유속, 경심, 유량등을 각 河道區間에서 산정하여야 한다. 이를 위하여 하천 水理解析에서의 기본식인 (1), (2)식의 連續方程式과 運動方程式을 이용하여 해석하였다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_r \right) = 0 \quad (2)$$

여기서, Q : 유량 A : 통수단면적 h : 수위
 x : 거리 t : 시간
 S_r : 에너지선의 경사
 (S_r = n² | Q | / A² R^{4/3})
 q : 支流동에 의한 側方流入量

흐름을 定常流 狀態로 보면 (1), (2)식에서 時間 微分項은 消去되고(∂/∂t=0) 다음과 같이 單純化 시킬수 있다. 즉, 정상류 상태의 경우에 있어서 하도 내의 각 단면에서의 유량은 다음식에 의하여 결정된다.

$$Q_{i+1} = Q_i + \bar{q}_i \Delta x_i \quad (3)$$

여기서, Q_i은 t=0에서 上流端에서의 정상류 상태에서의 유량이고, \bar{q}_i 는 각 Δx_i 區間에 대한 支流

동에 의한 平均流入量이다. 初期流量 Q_i에 대한 初期水位 h_i는 運動方程式을 정상류 상태로 변화시켜 계산하게 된다.

$$\left(\frac{Q^2}{A} \right)_{i+1} - \left(\frac{Q^2}{A} \right)_i + \bar{g}A_i(h_{i+1} - h_i + \Delta x_i \bar{S}_{ri}) = 0 \quad (4)$$

常流의 경우에 있어서는 (4)식의 계산은 下流端에서 上流方向으로 진행되며, 非線形式의 해는 (5)식과 같은 Newton-Raphson 방법에 의하여 그 해를 구할 수 있다.

$$x^{k+1} = x^k - \frac{f(x^k)}{f'(x^k)} \quad (5)$$

여기서, x는 未知의 水位 h_i, k는 反復計算의 數, f(x^k)는 初期假定值 x^k에 대한 (4)식에 의한 값, f'(x^k)는 (4)식을 水位에 대하여 微分한 結果 値에 의한 값을 나타내며 f'(x^k)는 (6), (7)식과 같이 표시된다.

$$f'(x^k) = \frac{df(x^k)}{dh_i} = \left(-\frac{Q^2 B}{A^2} \right)_i + \frac{1}{2} g B_i (h_{i+1} - h_i + \bar{S}_{ri} \Delta x_i) + g \bar{A}_i \left(-1 + \Delta x_i \left(-\frac{d\bar{S}_{ri}}{dh_i} \right) \right) \quad (6)$$

$$\frac{d\bar{S}_{ri}}{dh_i} = 2\bar{S}_{ri} \left(\frac{dn/dh_i}{n} - \frac{5\bar{B}_i}{6\bar{A}_i} + \frac{d\bar{B}_i/dh_i}{3\bar{B}_i} \right) \quad (7)$$

여기서, n : Manning 의 조도계수 B_i : 수면폭 각 하도면에서의 수위를 계산하는 과정에서 河道 斷面의 幾何學的 形狀은 그림 1과 같은 水位-水面 幅의 관계를 이용하였다.

하도단면간의 거리 Δx의 선정은 하도단면의 변화 특성의 정도에 따라 결정된다. 하도단면구간의 모든 變化 樣相은 線形인 것으로 가정하였고 이 경우 임의의 수위 h에 대한 수면폭, 통수단면적, 경심등은 각각 (8)-(10)식에 의하여 계산하였다.

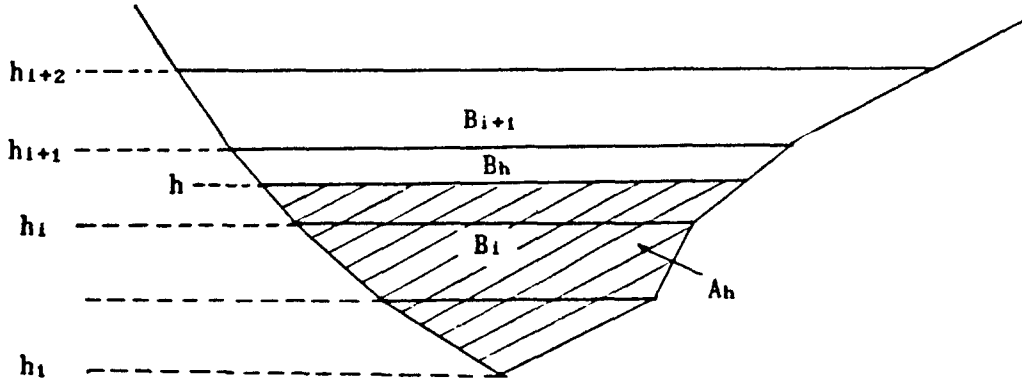


그림 1. 하도단면의 기하학적 형상

$$B_h = B_i + \frac{h-h_i}{h_{i+1}-h_i}(B_{i+1}-B_i) \quad (8)$$

$$A_h = A_i + \frac{1}{2}(h-h_i)(B_h+B_i) \quad (9)$$

$$R_h = \frac{A_h}{B_h} \quad (10)$$

위와 같은 계산과정을 통하여 수문학적으로 결정된 월별 평균 및 최소유량에 대한 수심, 통수단면적, 유속, 경심 등의 자료가 얻어지게 되고, 이 계산결과는 확정론적 수질해석 모형 계산과정에 수리학적 영향인자의 기본자료가 된다.

2.2 河川 水質解析

1次元的 汚染物 流動 解析을 위한 流體移動-擴散方程式은 (11)식과 같이 표시된다.²⁶⁾

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(E \frac{\partial C}{\partial x} - UC) \pm \sum S_i \quad (11)$$

여기서, C : 오염물의 농도 [ML⁻³]

t : 시간 [T]

U : 흐름의 유속 [LT⁻¹]

E : 종확산계수 [L²T⁻¹]

$E \frac{\partial C}{\partial x}$: 흐름방향의 확산에 의한 mass flux [ML⁻²T⁻¹]

UC : 흐름방향의 유체이동에 의한 mass flux [ML⁻²T⁻¹]

S_i : sources 또는 sinks 항 [ML⁻³T⁻¹]

하천에서의 汚染負荷가 連續的으로 流入되는 경우 擴散에 의한 汚染物의 移動은 물의 흐름에 의한 移動에 비하여 무시할수 있어 PF 모형(Plug Flow model)으로 고려될 수 있으며, 모든 水質成分의 物理, 化學, 生物學的 反應 動力學은 1次 反應 (first-order kinetics)으로 가정하였다. 즉, BOD의 감소, BOD 감소에 따른 DO의 감소, 재포기, 고형물의 침전 등 수질관련 동역학적 계수를 1次 反應으로 보고 해석하였다. 하천 수질에 있어 대표적인 오염인자인 溶存酸素(DO), 生物化學的 酸素要求量(BOD), 窒素性 酸素要求量(NOD)등에 관련된 反應을 그림 2에서와 같이 도시할 수 있다.

그림 2의 과정을 DO-BOD-NOD 관련식에 적용하고 定常狀態의 條件下에서는 (11)식에서 $\partial C/\partial t = 0$ 가 되어 각각 (12)-(14)식과 같이 표시된다.

$$\text{BOD} : U \frac{\partial L}{\partial x} = -(k_1 + k_3)L + L_D \quad (12)$$

$$\text{NOD} : U \frac{\partial N}{\partial x} = -k_4 N + N_D \quad (13)$$

$$\text{DO} : U \frac{\partial C}{\partial x} = k_3(C_s - C) - k_1 L - k_4 N - R + P(t) \quad (14)$$

k₁ : BOD제거율(탈산소계수)day⁻¹

- k_2 : 재포기계수 day^{-1}
- k_3 : 침전 및 흡착에 의한 제거율 day^{-1}
- k_4 : NOD 제거율 day^{-1}
- L : BOD의 농도 mg/l
- L_D : 비점원 BOD부하 mg/l/day
- N : NOD의 농도 mg/l
- N_D : 비점원 NOD부하 mg/l/day
- C : DO의 농도 mg/l
- C_s : DO의 포화농도 mg/l
- R : 조류에 의한 호흡을 mg/l/day
- P : 조류에 의한 광합성율로서 日中 시간에 대한 함수 mg/l/day

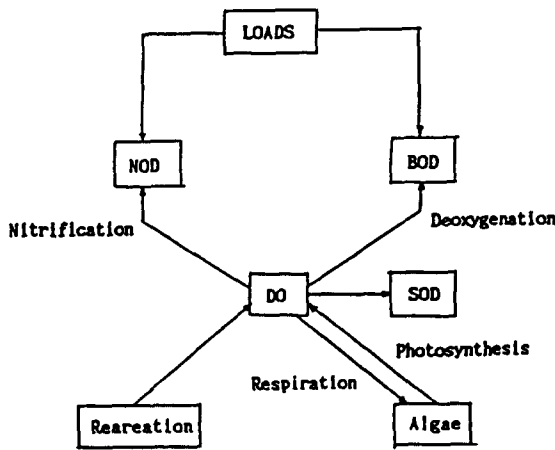


그림 2 용존산소에 미치는 영향인자

(12)-(14)식은 $x=x_0$ 에서 $L=L_0$, $N=N_0$, $C=C_0$ 라 하면 (15)-(17)식과 같은 해석적인 해를 구할 수 있다.

$$\text{BOD} : L = L_0 \alpha_3 + L_D \left(\frac{1 - \alpha_3}{k_1 + k_3} \right) \quad (15)$$

$$\text{NOD} : N = N_0 \alpha_4 + N_D \left(\frac{1 - \alpha_4}{k_4} \right) \quad (16)$$

$$\text{DO} : C = C_0 \alpha_2 + C_s (1 - \alpha_2) - k_1 L_0 \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{(k_2 - (k_3 + k_1))} - k_4 N_0 \frac{\alpha_4 - \alpha_2}{(k_2 - k_4)} + k_1 L_D \frac{(\alpha_2 - \alpha_3)}{(k_1 + k_3)(k_1 + k_3 - k_2)}$$

$$-k_1 L_0 \frac{(1 - \alpha_2)}{k_2 (k_1 + k_3)} + N_D \frac{(\alpha_2 - \alpha_4)}{(k_4 - k_2)} - N_D \frac{(1 - \alpha_2)}{k_2} - R \frac{(1 - \alpha_2)}{k_4} + P(t) \frac{(1 - \alpha_2)}{k_4} \quad (17)$$

여기서, L_0 , N_0 , C_0 : 각각 BOD, NOD, DO의 초기농도

$$\alpha_2 = \text{Exp}(-k_2 \frac{X}{U})$$

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

$$\alpha_4 = \text{Exp}(-k_4 \frac{X}{U})$$

하천에서의 k_1, k_2, k_3, k_4 등의 반응계수의 값들은 온도에 따라 변화하게 되며 변화양상은 (18)식과 같이 나타낼 수 있다. ^{18), 23)}

$$k = k_{20} \theta^{(T-20)} \quad (18)$$

여기서, k : 반응계수 k_1, k_2, k_3, k_4 의 값

T : 하천의 수온

k_{20} : 20°C에서의 반응계수

θ : 온도보정계수로서 1.025-1.135의 값

2.3 確定論的 水質解析 模型의 開發

하천수질의 확정론적 해석을 위해서는 많은 모형들이 개발되어 사용되고 있으나, 우리나라에서 적용하기에는 하천의 수리, 수문학적 특성의 相異性, 各種 反應係數들의 不充分 및 地域的 特殊 與件 등으로 많은 문제점들이 있는바, 본 연구에서는 2.1-2.2절에서 기술한 관련식등을 중심으로 국내 하천 유역에 적합한 확정론적 수질해석 모형 RQ1을 개발하였다. RQ1은 월별 평균유량과 최소유량을 回歸分析을 통하여 산정하고 하천의 水理學的 不等流解析을 실시하는 RQ1-1과 extended Streeter-Phelps식의 analytical solution의 계산을 위한 RQ1-2로 구성되어 있다. 월별 평균유량과 최소유

량은 水文調査年報(건설부, 1977-1989)에서 정리하였는바, 월별 평균유량은 주요 水位標 地點의 월 평균 수위자료로 부터 월평균 유량을 환산하여 계산하였고 월별 최소유량은 매월 유량이 최소가 되는 날중 시간적으로 큰 차이가 없는 것을 채택하여 평균하여 사용함으로써 자료의 일관성을 꾀하였다.

RQ1-1의 계산을 위한 입력자료로서는 주요 수위표 지점에서의 수위-유량관계식, 합류점별 유역면적 및 유로연장과 하도단면에서의 수위-수면폭 자료, 하상경사, Manning의 조도계수 등이 필요하며 하도내의 월별 평균 및 최소 유량을 산정하고 이를 대상으로 하여 하도 각 단면에서의 수위, 유속, 통수단면적, 경심등의 값을 계산하게 된다.

RQ1-2는 RQ1-1에서 계산된 하천의 수리학적 자료를 기초로 하고 상류 수질의 초기조건, 오염물의 부하 위치 및 그 부하량 및 각종 동역학적 반응계수를 입력자료로 하여 하천 각 지점에서의 DO, BOD, NOD 의 종단형상을 계산한다.

또한 BOD, NOD의 최대농도 지점과 DO 최저농도 지점에서 대상구간에 대한 目標水質을 달성하기 위하여 허용할 수 있는 最大汚染 負荷量을 月別로 구하고 연중 最惡 條件이 발생하는 달을 선택하여 이 시기를 기준으로 허용 오염부하량을 계산할수 있도록 구성하였다. 그림 3은 본 확정론적 모형의 계산흐름도를 나타내고 있다.

3. 洛東江 中流部에서의 水質解析

3.1 水文學的 特性解析

낙동강 중류부에 대한 수질해석을 위하여 琴湖江, 南江등의 주요 오염원을 가진 支流로 포함하는 왜관에서 진동에 이르는 110.9km를 대상구간으로 선정하였다. 낙동강 유역은 최근 10여년 동안 안동댐의 건설(1976), 영천댐(1980), 낙동강하구언(1988), 합천댐(1989)등의 준공 및 유역내의 都

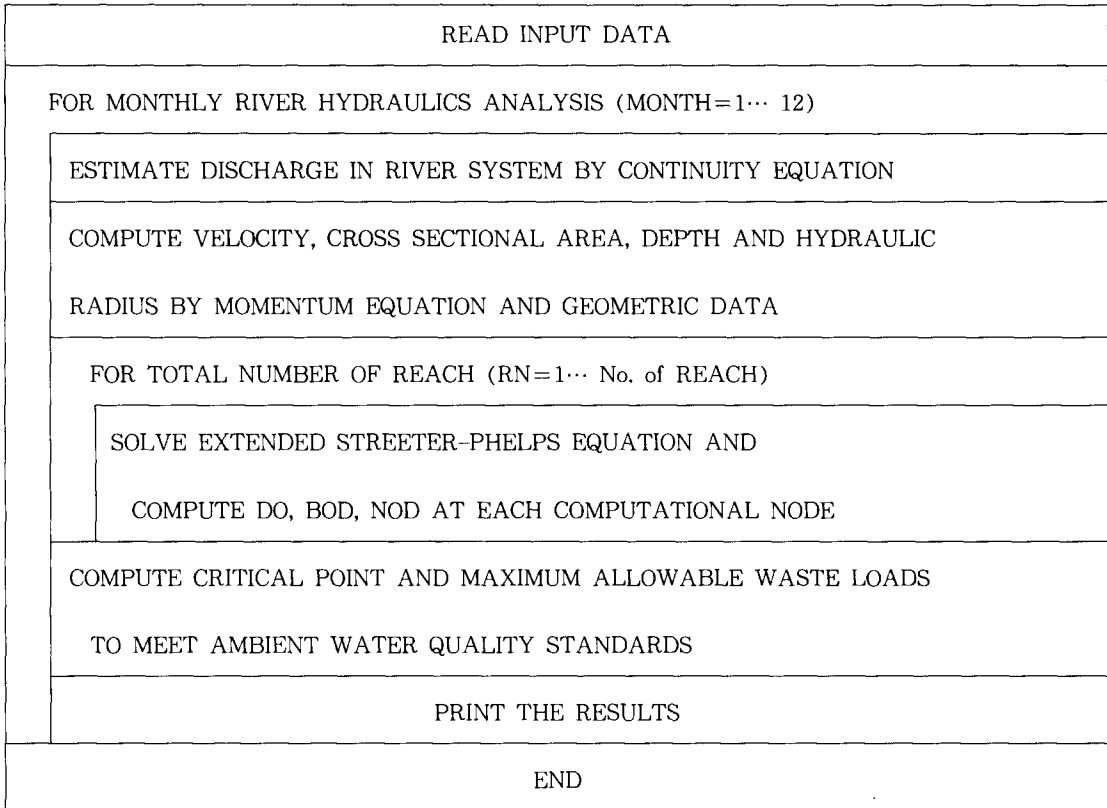


그림 3 확정론적 수질모형의 계산흐름도

표 1 주요지점별 유로연장 및 유역면적

지 점	유로연장(km)	유역면적 (km ²)	
		지류상	합류점상
왜 관 수위표	110.9	-	11074.4
백 천 합류점	94.2	288.5	11195.9
금호강 합류점	84.3	2087.9	11642.8
회 천 합류점	39.2	-	14210.5
황 강 합류점	33.1	1325.6	15043.5
신반천 합류점	26.9	194.8	16391.5
남 강 합류점	4.7	3466.3	16837.2
진 동 수위표	0.0	-	20311.3

市化 地域의 增大등으로 인하여 이 구간내의 하천 유량은 큰 변화를 갖게 되었다. 특히 上流部의 流量供給源이었던 安東댐 竣工의 영향은 지대할 것으로 보고 안동댐 준공이후에서부터 최근까지인 1977-1989까지의 13년간의 수문자료를 기초로하여 河川流況을 분석하였다. 왜관-진동에 이르는 구간의 주요지점별 流路延長과 流域面積은 표 1과 같다.

수질 관리 측면에서 분석하여야할 유량은 7day-10year 갈수량 및 갈수량, 저수량 등을 대상 유량으로 할 수도 있겠으나 우리나라 유역의 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. 월

별 평균유량의 산정은 수문조사연보¹⁾에서 월 평균 수위를 유량으로 환산하여 평균하였는데, 자료의 信憑性 문제 때문에 비교적 그 信賴度가 높다고 판단된 왜관과 진동지점의 자료를 기초로 하였다. 우선 이들 두지점의 유역면적과 유량을 回歸시켜 그 식으로 부터 지천이 合流하는 점들의 유역면적에 대한 유량을 구하였고 진동에서 각 合流點까지의 距離와 流量을 回歸시켜 계산하였다.

왜 관

$$H < 0.91^m \quad Q = 0.8247 (H + 0.94)^{5.2877}$$

$$0.91 < H < 2.85 \quad Q = 0.1527 (H + 1.55)^{5.4848}$$

$$H > 2.85 \quad Q = 0.42459(H + 3.04)^{4.0064} \quad (19)$$

표 2 합류점별 유량산정을 위한 회귀식(Q=α exp(-β))

월 별	평 균 유 량		최 소 유 량	
	α	β	α	β
1	97.4	0.0019	87.3	0.0035
2	103.2	0.0028	75.5	0.0035
3	116.9	0.0030	58.4	0.0007
4	207.8	0.0069	84.4	0.0053
5	149.1	0.0048	73.6	0.0056
6	270.3	0.0072	65.6	0.0031
7	661.6	0.0053	162.4	0.0066
8	545.0	0.0059	132.5	0.0056
9	575.0	0.0069	239.3	0.0093
10	238.4	0.0088	134.1	0.0072
11	154.5	0.0066	97.0	0.0050
12	119.0	0.0048	71.2	0.0018

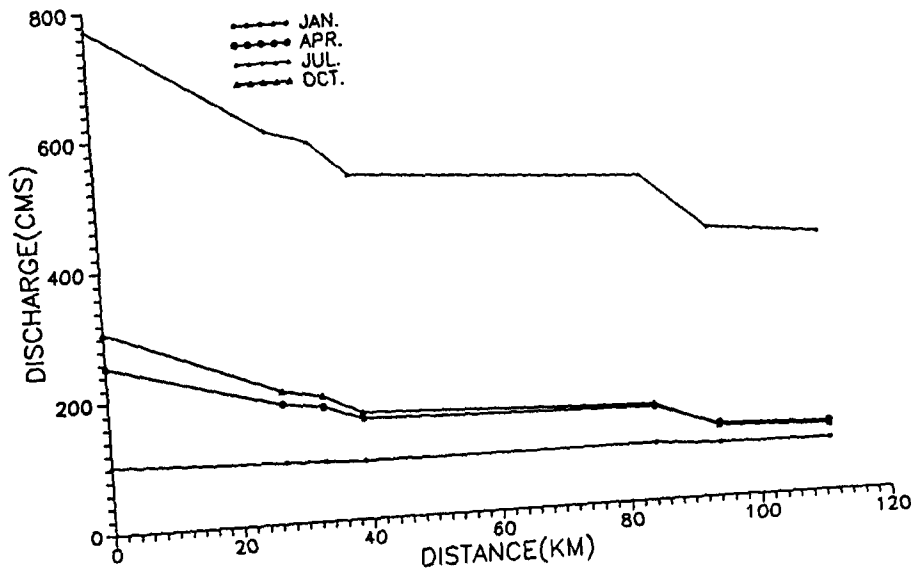


그림 4 주요 합류점별 월 평균 유량

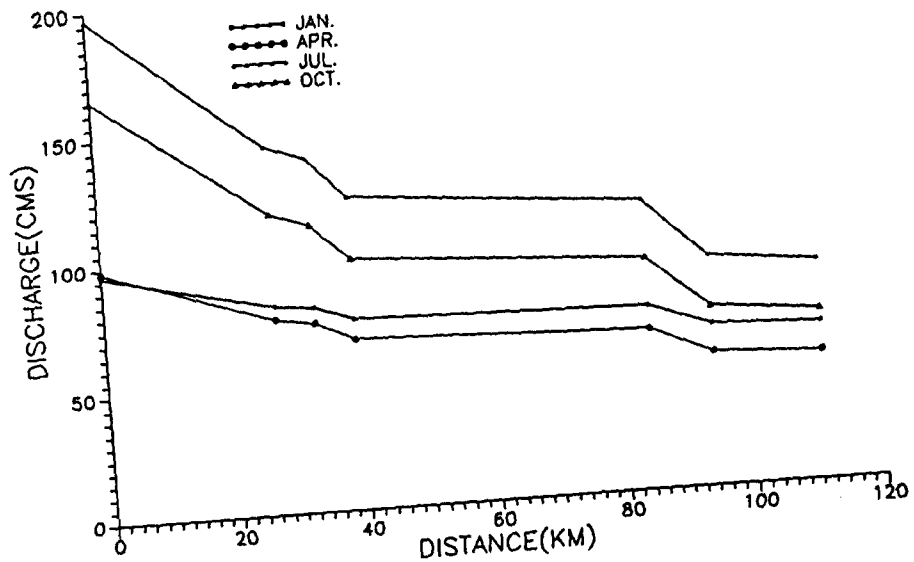


그림 5 주요 합류점별 월 최소 유량

진동

$$\begin{aligned}
 H < 1.17^m \quad Q &= 0.2916 (H + 2.76)^{3.8238} \\
 1.17 < H < 3.49 \quad Q &= 311.6395(H - 0.99)^{1.0277} \\
 H > 3.49 \quad Q &= 36.3850 (H + 0.24)^{2.3471} \quad (20)
 \end{aligned}$$

여기서, H는 각 수위표 지점의 수위표 수위이다.

최종적으로 계산된 각 합류점별 유량-유로연장 간의 回歸分析 結果는 표 2에 정리하였는데 相關係數는 각 경우 모두 0.95 이상으로 높게 나타났다. 표 2에서 Q는 유량(CMS), l는 유로연장(km), α , β 는 회귀상수이다.

주요 합류점에 대한 1, 4, 7, 10월에서의 월 평균 및 최소유량은 그림 4,5와 같다.

3.2. 水理學的 不等流 解析

앞절에서 계산된 하도 주요 합류점에서의 유량 자료를 이용하고 “낙동강 하천 정비 기본계획 (1981, 1983)”^{2),3)}으로 부터 하도의 기하학적 단면자료를 정리하여 2.1절에서 주어진 계산방법에 의하여 不等流 解析을 실시하여 수질해석시의 水理學的 影響因子인 流速, 通水斷面積, 水深등의 자료를 계산하였다. 조사된 河道斷面은 53개 단면을 취하였는데 이 구간의 平均河床 傾斜는 약 0.00021이었고 Manning의 조도계수는 0.030을 적용하였다.^{3),4),5)} 부등류 해석은 月別로 하여 平均流量 및 最小流量에 대하여 53개 斷面에 대하여 실시되었다. 각 하도단면에 대하여 계산된 부등류 해석 결과는 수질해석을 위하여 유량, 하폭, 통수단면적 및 반응계수등의 變動範圍가 작게 나타난 15개의 小區間으로 나누어 水理學的 特性因子와 水質特性因子를 小區間別 入力資料로 하였다.

3.3. 汚染 負荷

왜관에서 진동에 이르는 낙동강 중류부의 오염원 으로서는 大邱, 慶山, 永川등을 중심으로한 琴湖江과 胄州를 중심으로한 南江이 主汚染源이고 왜관, 고령, 합천, 창녕, 부곡, 남지등의 시와 읍이 편재하여 백천, 진천천, 차천, 회천, 황강등의 지류를 통하여 또는 직접 낙동강으로 유입되고 있다. 오염

원 자료는 “낙동강유역 환경보전 종합계획사업 (1985)”¹⁶⁾으로 부터 수집하였다. 그림 6은 주요 오염원 부하자료를 요약한 것이다.

3.4. 確定論的 水質解析

수리, 수문학적 해석결과 및 오염 부하자료를 이용하여 그림 6에서와 같이 왜관-진동에 이르는 낙동강 중류부에서의 水質解析을 실시하였다. 河道區間은 3.2절에서 기술한 바와 같이 15개 소구간으로 분할하였다. 이 유역에 대한 종합적인 수질관리 보고서인 “洛東江流域 環境保全 綜合計劃事業 (1985)”¹⁶⁾으로부터 관련되는 자료를 수집하였다.

이 보고서에 의하면 脫酸素係數 자료만을 수집할 수 있었으며, 각 하도소구간에 대한 k_1 의 값은 보고서¹⁴⁾에서 조사된 $0.1-0.4\text{day}^{-1}$ 의 범위가 구간별로 적용되었고, 재포기계수 k_2 의 값은 (21)식과 같은 O'Connor-Dobbins의 식²²⁾을 이용하였으며 k_1 , k_2 에 대한 온도보정계수는 (18)식에서 θ 가 각 각 1.045와 1.021을 적용하였다.

$$k_2 = 13 \cdot \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}} \quad (21)$$

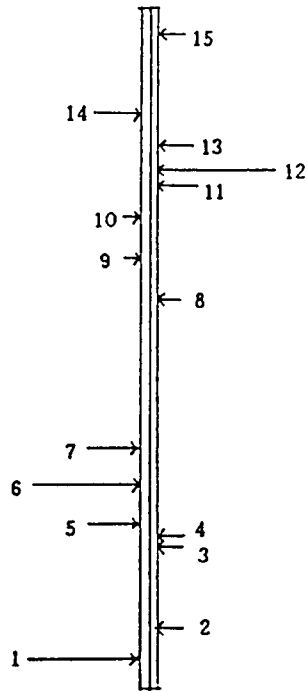
여기서, U : 유속(ft/sec) H : 수심(ft)

표 3은 하도구간에서의 월별 수온과 DO의 포화농도, 상류단의 BOD, DO의 초기조건치를 정리한 것이다.

확정론적 수질해석모형을 이용하여 1984년 오염 부하량자료¹⁶⁾를 기준으로 왜관-진동 구간에서 월별 평균유량과 최소유량에 대한 BOD-DO 해석을 실시하였다. 계산결과 BOD가 크게 나타난 수질이 좋지 않은 달은 평균유량의 경우 1, 2, 3, 5, 12월로 나타났고 최소유량의 경우 2, 3, 5, 6월로 나타났다. 7, 8, 9월은 다른달에 비해서는 수질이 良好한 것으로 나타났으나 이 경우에도 역시 DO 不足量은 DO 最小地點을 기준으로 2.6-4.9mg/l로 크게 나타났다. 금호강에 의한 오염도는 매우 큰것으로 나타나 낙동강 전유역에서의 效率的인 水質管理를 위해서는 금호강의 水質改善이 先行되어야 할것으로 사료되었다.

표 3 월별 수온과 DO의 포화농도 및 BOD, DO 의 초기조건

월 별	수 온(°C)	Sat. DO(mg/l)	BOD(mg/l)	DO(mg/l)
1	4.06	13.09	3.3	12.2
2	1.93	13.86	3.1	11.5
3	7.50	11.99	2.9	10.8
4	16.00	9.87	1.7	8.6
5	21.13	8.90	4.1	8.0
6	28.70	7.73	4.1	7.8
7	23.06	8.56	3.0	7.4
8	27.75	7.87	4.0	6.7
9	24.18	8.40	3.1	8.3
10	18.63	9.35	3.1	8.3
11	12.88	10.56	2.5	11.0
12	4.81	12.83	2.2	10.7



번 호	위 치 (km)	BOD부하량(kg/d)		주 요 지 류
		case 1*	case 2**	
1	4.7	2007	1725	남 강
2	9.0	19	18	
3	23.5	60	78	
4	25.0	50	50	
5	26.9	51	51	신반천
6	33.1	741	747	황 강
7	39.2	287	285	회 천
8	63.0	363	363	차 천
9	70.5	18	18	
10	76.5	23	23	
11	82.0	3185	3180	진천천
12	84.3	53586	49804	금호강
13	88.5	31	31	
14	94.2	198	194	백 천
15	107.6	95	95	

*) 평균유량에 대한 부하량

**) 최소유량에 대한 부하량

그림 6 확정론적 수질해석 모형도

그림 7은 DO농도가 최소인 6월의 평균유량에 대한 DO와 BOD의 종단형상을 나타내고 있다. 표 4, 5는 월별 평균유량과 최소유량에 대한 BOD 최고치, DO 최저치를 나타내고 있다. 표 4, 5에서 보는 바와 같이 BOD최고지점은 금호강 합류점 (84.3Km) 및 진천천 합류점 (82Km)으로 나타났는데 평균유량의 경우 1, 2월에 BOD농도가 약

10.0mg/l이고 7, 8, 9 월의 경우 3.3-4.0mg/l의 범위로 나타났다. DO의 최소지점은 현풍하류부 (51Km)로 나타났는데 모두 환경기준 1 등급 (DO 7.5mg/l 이상)에도 미치지 못하는 것으로 나타나 이 유역에 대한 集中的인 水質管理가 요망되는 것으로 판단되었다.

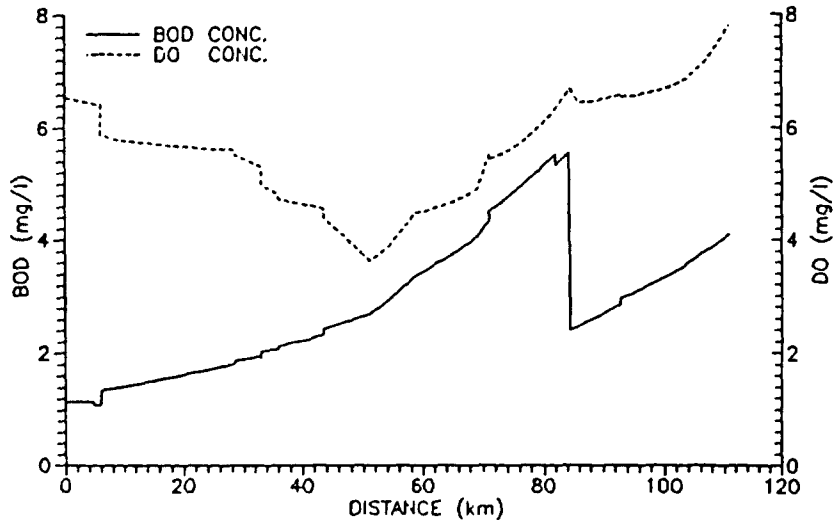


그림 7 BOD-DO의 종단형상 (6월, 평균유량)

표 4 BOD 최고치 및 DO 최저치 (월 평균유량)

월별	BOD최고치		DO최저치		
	지점(km)	BOD(mg/l)	지점(km)	DO(mg/l)	DO deficit
1	82*	9.97	51***	8.85	4.24
2	82	9.80	51	9.91	3.95
3	82	8.73	51	7.99	4.00
4	82	5.71	51	6.76	3.11
5	82	8.00	51	3.96	4.94
6	84.3**	5.55	51	3.63	4.10
7	84.3	3.25	51	5.92	2.64
8	84.3	3.96	51	4.45	3.42
9	84.3	3.49	51	5.83	2.57
10	82	6.20	51	5.75	3.60
11	82	7.71	51	6.66	6.33
12	82	8.82	51	9.09	3.74

*) 82.0km 지점 : 진천천 합류점

**) 84.3km 지점 : 금호강 합류점

***) 51.0km 지점 : 현풍 하류부

모델링 결과의 신뢰성을 검토하기 위하여 '85년 4월과 '84년 12월의 월평균 및 최소유량에 대하여 DO의 縱斷形狀을 도시하고 이를 당시의 實測値와 비교하여 그림 8, 9에 나타내었다. 그림 8, 9에서 보는 바와 같이 DO의 계산치와 실측치는 그 變動樣相에 있어 類似한 傾向을 띄고 있었으며, 앞으로 본 연구의 적용에 있어 고려하지 못한 NOD, SOD

등의 影響을 追加로 고려하고 각종 反應係數의 보다 正確한 檢證을 통하여 계속 보완시켜야 할 것으로 사료되었다. 또한, 주요 지점에서의 조사된 BOD의 실측치와 계산치를 표 6에서와 같이 비교하였다. 실측치와 계산치는 각각 3, 4, 5월('85년) 및 10, 11, 12월('84년)의 6개월에 대한 값을 비교한 결과 비교적 합리적인 범위 내에 들고 있었다.

표 5 BOD 최고치 및 DO 최저치 (월 최소유량)

월별	BOD최고치		DO최저치		
	지점(km)	BOD(mg/l)	지점(km)	DO(mg/l)	DO deficit
1	82	10.91	51	8.42	4.67
2	82	12.16	51	8.85	5.01
3	82	12.91	51	5.82	6.17
4	82	10.70	51	4.08	5.79
5	82	13.28	51	1.41	7.49
6	84.3	12.51	51	0.46	7.27
7	82	6.96	51	4.17	4.39
8	82	8.03	51	2.56	5.31
9	82	5.79	51	4.65	3.75
10	82	8.48	51	4.50	4.85
11	82	9.74	51	5.68	4.88
12	82	11.10	51	7.41	5.42

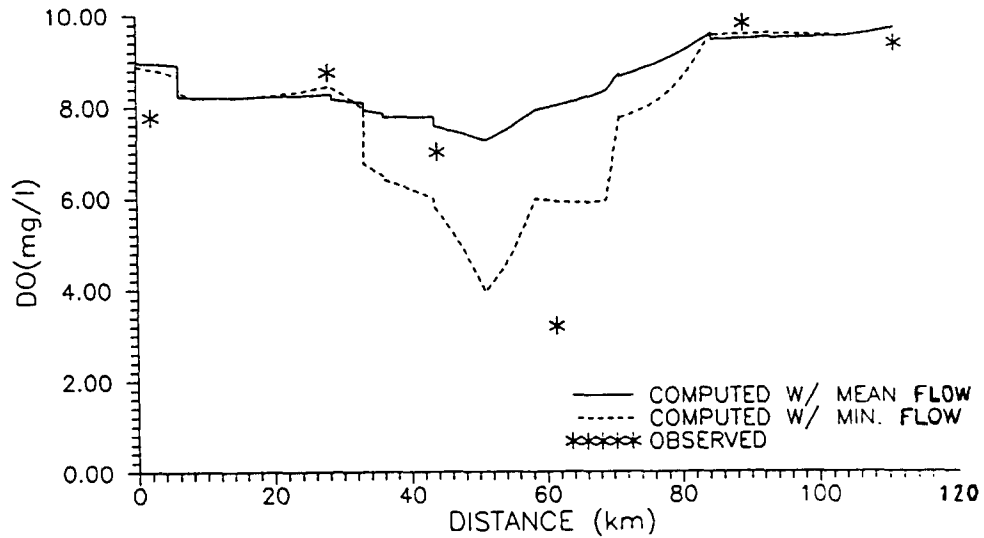


그림 8 DO의 종단형상 (4월)

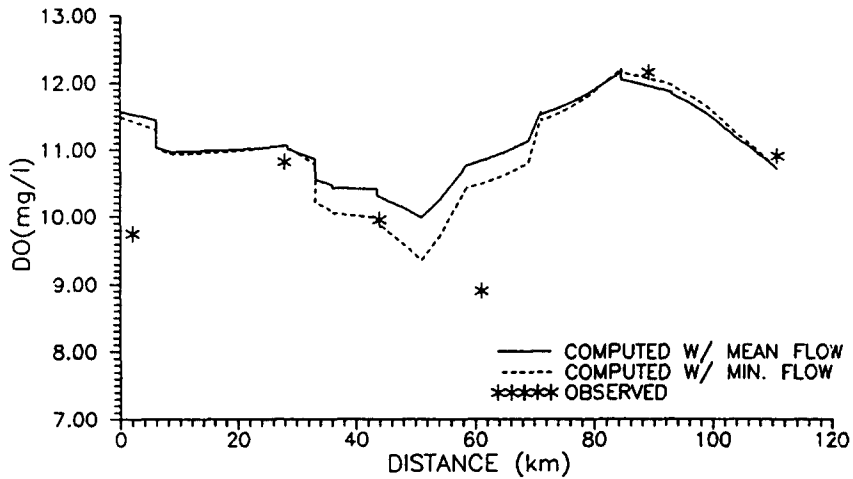


그림 9 DO의 종단형상 (12월)

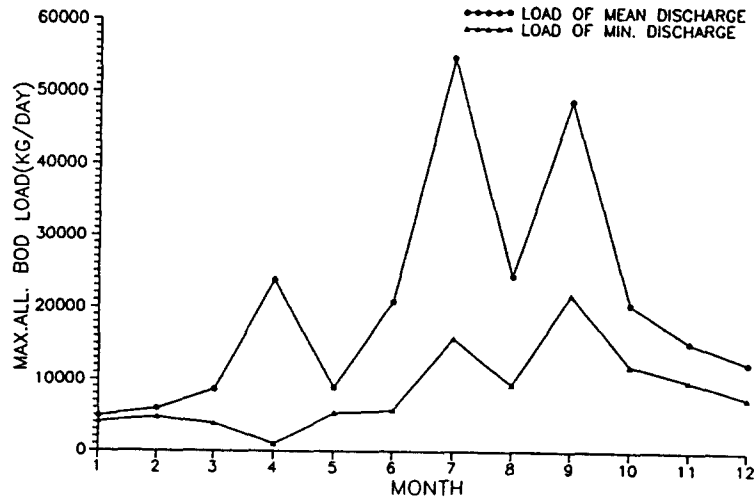


그림 10 목표수질 달성을 위한 금호강의 허용 부하량

표 6. BOD 실측치와 계산치의 비교

지 점 명	실측치(mg/l)	계산치(mg/l)
왜 관	1.9 - 5.3	1.7 - 4.1
달 성	1.5 - 4.0	1.3 - 3.5
대 암	2.0 - 10.9	2.8 - 7.6
적포교	1.7 - 8.9	2.2 - 6.7
남 지	1.6 - 8.0	1.3 - 5.2

낙동강 중류부에서 현재 및 장래의 오염 추세로 볼 때 BOD, DO의 最惡 地點에서 1級 上水水質 (BOD 1mg/l 이하, DO 7.5mg/l 이상)을 유지하기는 經濟的 費用 投資面에서 상당히 어렵다고 볼 수 있기 때문에, 우선은 실현 가능한 2級 上水水質 (BOD 3mg/l 이하, DO 5mg/l 이상)을 目標水質로 설정하는 것이 타당하다고 사료된다. 낙동강 중류부에서 목표수질을 위협하고 있는 主要原因은 大邱

를 중심으로 유하하는 琴湖江의 污染源이다.⁷⁾ 확정론적 수질해석 모형을 이용하여 장래에 목표수질 BOD 3mg/l를 낙동강 중류부 수 水域에서 달성하기 위하여 금호강에서 許容 可能的 最大 汚染 負荷 量을 그림 10에 도시하였다. 그림 10에서 보는 바와 같이 濁水期인 1, 2, 3, 6월에서의 최대 허용 오염 부하량은 각각 4065, 5966, 8695, 8935kg/day로 나타났다.

夏節期에 DO가 문제가 되는 것은 水溫이 높음으로 인하여 DO의 飽和濃度가 낮게 나타남에 기인하며, 冬節期에는 水溫이 낮음으로 인하여 DO의 포화농도가 비교적 높게 유지되므로 DO는 크게 문제가 되지 않았다. 따라서, 水溫 變化幅이 비교적 큰 國內 河川 流域에 대하여 同 한 DO의 基準을 設定하는 것은 무리가 있는 것으로 사료되었으며 冬節期 및 夏節期에 적합한 DO의 水質管理 基準이 關聯機關에 의하여 수립되어야 할 것으로 판단되었다.

冬節期 및 濁水期에 문제가 되는 BOD의 경우 河川에서의 流量과 큰 연관을 가지고 있기 때문에 堰 放流등을 통한 適定流量을 확보함과 동시에 특히 이 시기에는 각 下水處理場에서의 排出許容濃度를 현재의 기준보다 더욱 강화하여야 할 것으로 사료되었다. 夏節期の DO 농도를 改善하기 위해서는 금호강의 汚染負荷 處理의 增大 이외에도 DO 最小點 附近에서의 포기(aeration)를 위한 水工構造物의 設置, 水中 plant 및 weeds의 除去, 河狀浚渫을 통한 하상 산소요구량등을 감소시키는 방안도 적극적으로 검토해 보아야 할 것으로 사료되었다. 앞으로 이 유역에서의 보다 효율적인 수질관리를 위해서는 본 확정론적 모형을 확장 발전시킨 체계 학적 모형의 개발도 필요할 것으로 판단되었고 이는 향후에 연구과제로 하였다.

4. 結 論

본 연구는 왜관에서 진동에 이르는 낙동강 중류부에서의 확정론적 수질해석을 실시한 것으로서 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 하천 수질의 효율적인 관리를 위하여 確定論的 水質解析 模型 RQ1을 개발하였다. RQ1은 水

理, 水文學的 解析을 위한 RQ1-1과 水質解析을 위한 RQ1-2로 구성되어 있다.

2) 洛東江 中流部에서의 수질해석을 위하여 이 유역의 수리, 수문학적 자료를 수집하고 왜관-진동구간에 대한 월별 평균유량과 최소유량을 산정하였다. 이 유역의 河道의 幾何學的 特性을 기초로 不等流 解析을 실시하여 하도구간 내에서 流量, 流速, 河幅, 通水斷面積, 徑深등을 계산하여 水質 解析시의 水理學的 特性值가 되도록 하였다.

3) 確定論的 水質解析 模型을 통하여 이 유역에 대한 수질해석을 실시하였다. 計算 結果 BOD값의 最大地點은 금호강 합류점 또는 진천천 합류점으로 나타났으며 DO값의 最小地點은 현풍 하류부로 나타났다.

4) 確定論的 模型에 의한 DO와 BOD의 計算値와 實測値의 比較는 각각 그 縱斷形狀과 數個地點에서의 平均値에 대하여 비교적 일치하고 있었다. 國內 하천수질의 特性上: 月別 및 季節別 水質管理의 必要性을 지적하였고, 확정론적 수질해석 모형을 이용하여 水質 最惡地點을 基準으로 目標水質에 到達하기 위한 금호강에서의 最大許容 BOD 負荷 量을 算定하였다.

參 考 文 獻

1. 건설부, "한국수문조사연보", 1977-1989.
2. 건설부, "낙동강 하천정비 기본계획 (보완조사 I)", 1981.
3. 건설부, "낙동강 하천정비 기본계획 (보완조사 II)", 1983.
4. 건설부, "낙동강 유량측정 조사보고서", 1986.
5. 국립환경연구소, "전국 주요하천 기초조사 제 2차 년도 보고서", 1982.
6. 국립환경연구소, "전국 주요하천 기초조사 최종 보고서", 1983.
7. 국립환경연구소 외, "오염심화 하천의 실천적 정화 방안", 1986.
8. 이흥근, 한진석, "낙동강 중류부의 자정능력에 관한 연구," 한국수문학회지, vol.17, No.2, 1984.
9. 최홍식, 이길성, "QUAL-II 모형의 금강수계에의 적용", 대한상하수도학회지, Vol.2, 1987.

10. 한건연, 신용배, “하천수질관리를 위한 QUAL-Ⅱ 모델의 소개”, 대한토목학회지, Vol.29, No.6, 1981.
11. 한건연, “수치모형에 의한 하천수질관리에 관한 연구”, 경북대학교 논문집, Vol.38, 1984.
12. 한국건설기술연구원, “PC용 하천수질관리 모델의 개발(Ⅰ)”, 1987.
13. 한국건설기술연구원, “PC용 수질예측모델의 개량 및 응용”, 1988.
14. 한국과학기술원, “수계수자원 오염관리에 관한 연구”, 1981.
15. 한국과학기술원, “대기·수질 환경관리 전산모델 연구”, 1982.
16. 환경청, “낙동강유역 환경보전 종합계획사업 (수질 부분)”, 1985.
17. Bauer, D.P., Jennings, M.E., and Miller, J.E., “One-Dimensional Steady State Stream Water Quality Model”, US Geological Survey Water Resources Investigation 79-45, 1979.
18. Bowie, G.L., et.al., “Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling”, 2nd Ed., EPA/600/3-85/040, US EPA, 1985.
19. Brown, L.C., and Barnwell, T.O., “Computer Program Documentation for the Enhanced Stream Water Quality Model QUAL2E and QUAL2E-UNCAS”, EPA/600/3-87/007, US EPA, 1987.
20. Gromiec, M.J., Loucks, D.P., and Orlob, G.T., “Stream Quality Modeling”, in Mathematical Modeling of Water Quality : Streams, Lakes, Reservoirs, Orlob, G.T. ed., John Wiley & Sons, 1983.
21. Martin, J.L., “Simplified, Steady State Temperature and Dissolved Oxygen Model, User’s Guide”, Instruction Report E-86-4, US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1986.
22. O’Connor, D.J., and Dobbins, W.E., “Mechanism of Reaeration in Natural Streams”, Trans. of ASCE, Vol.123, 1958.
23. Thomann, R.V., and Mueller, J.A., “Principles of Surface Water Quality Modeling and Control”, Harper and Row, 1987.
24. US Army Engineer Waterways Experiment Station, “CE-QUAL-RIV1 : A Dynamic Longitudinal Water Quality Model for Streams”, Users Manual, Environmental Lab., Waterways Experiment Station, Nov., 1990.