

1차원 부정류 수리량 자료를 이용한 하천 수질 예측

River Water Quality Prediction Using 1-D Unsteady Flow Data

이광만*, 김수삼**, 고석구***, 선우중호****

1. 서 론

우리나라는 가용수자원의 대부분을 지표수에 의존하고 있으며 량과 질의 시간적 및 공간적 편기로 인하여 유역의 상류부에 댐을 건설하여 조절방류를 통해 하류측에서 필요로하는 량을 공급하고 있다. 그러나 대부분의 하천유역은 각종 개발로 인하여 오염물질의 유입이 시간 및 공간적으로 변하고 있어 용수공급지점에서의 기준수질의 유지라던가 하도 곳곳에서 생태계가 자정능력을 유지할 수 있는 하천 유지 용수량도 변하고 있다.

특히 우리나라의 강우-유출 형태는 하절기의 집중호우로인하여 단시간내에 이루어지며 이때 많은 량의 오염물질이 저수지나 하천으로 유입되고 있다. '92년의 한강수계 주요지점에서의 수질조사에 따르면 SS 및 BOD, T-P등이 유량증가에 따라 증가하는 추세를 보여주고 있다(한국수자원공사, 1992). 특히 Algae 성장의 제한영양염으로 작용하는 인(P)의 경우 유입량의 증가에 따라 급격히 증가하는 것으로 조사되었다. 이와같이 유량의 변화는 유역으로 부터의 오염원 유입뿐만 아니라, Reaction 및 Decay 등에 의해 지배되는 수질인자에도 큰 영향을 미치고 있다. 또한 저수지나 하천에 유입된 오염물질은 저류 혹은 침전되었다가 적절한 시기에 활동함으로써 수질관리에 어려움을 주고있다. '92년도에 조사(한국수자원공사, 1992)에 따르면 P의 경우 일부기간중 소양강본류 인제지점에서는 갈수시 11.4 $\mu\text{g}/\text{l}$ 로 조사되었으나, 강우에 의한 유량증가시 811.3 $\mu\text{g}/\text{l}$ 로 조사되었고 팔당근처인 이포나루의 경우 갈수때와 강우에 의한 유량증가시 각각 115.5 $\mu\text{g}/\text{l}$ 와 740 $\mu\text{g}/\text{l}$ 로 강우에 따른 변화가 큰것으로 나타났다. DIP와 DTP는 인제 유입수의 경우 강우가 있을 때와 없을 때 거의 변화가 없는데 반하여 이포나루의 경우 TP와 함께 증가하였다. 이는 강우에 의해 유역에 산재되어있던 물질들이 한꺼번에 다량 유입되었기 때문으로 사료되며, 강우가 많을 때 인제와 이포나루의 DIP, DTP의 차이는 유역의 특성에 따른 차이로 인제는 유역이 주로 삼림지역인데 반하여 이포나루는 유역의 대부분이 도시이기때문에 인간활동에 의한 영향이 큰것으로 조사되었다. 따라서 이와같은 현상을 고려할때 우리나라에서의 유역개념의 수질관리 문제는 크게 갈수기와 홍수기로 구분하여 분석하는 것이 바람직할 것이며, 대부분의 오염물질이 홍수기 강우 유출에의하므로 이를 고려한 수질예측이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 저수지 운영을 포함한 수질예측을 위하여 BLTM의 흐름추적에 의한 수질예측에 두고, 수리량 계산은 1차원 부정류 모형을 이용하여 구하고 Reaction 및 Decay는 Algae등 생태계(1925)를 모의할 수 있는 QUAL2모형을 이용하였다. 이는 과거의 분석이 주로 Streeter와 Phelps 모형에 근거하였다면 보다 개선된 접근 방법이라 할 수 있으며, 개수로에서 DO 및 BOD등 9개의 수질 관련 인자를 1차원 Lagrangian Transport Model(1987)을 이용하여 충주 조정지 직 하류부터 남한강과 북한강 합류 직전까지 모의하였다.

* 한국수자원공사, 수자원연구소, 연구원, 중앙대 박사과정 수료

** 중앙대학교, 토목공학과 교수

*** 한국수자원공사, 조사계획처장, 공학박사

**** 서울대학교, 토목공학과 교수

2. 기초이론

2.1 BLTM(Branched Lagrangian Transport Model)

1차원 Transport Model은 하천에서 수질인자의 변화를 예측하는데 매우 유용하게 이용될 수 있다. 이 모형은 물이 하류로 흘러가는 형태와 같이 흐름방향으로 이동하면서 모의하게 된다.

Transport Modeling에서 유입수는 즉시 하천전단면에 걸쳐 균등하게 혼합되고 평균유속에 의해 하류로 이동되며, 이때 수질인자를 하류로 이동시키는 주요 운동 형태는 대류(convection)이며, 또한 대류가 발생하면 수질인자는 하류방향으로 확산이 일어난다. 결국 진행과정은 대류-확산 방정식(convection-dispersion equation)을 해결하는 것이며, 이방정식은 질량보존의 법칙(principle of conservation of mass)으로 유도할 수 있고 수치해법으로 해를 구할 수 있다.

이와같은 문제의 대부분의 해석 방법은 공간적으로 계산상의 절점이 고정되어있는 Eulerian Reference Frame이다. Eulerian Modeling은 개념화시키기는 쉬우나 계산은 매우어렵고 결과는 정확하지 않으며 진동하거나 불안정(unstable)할 수 있다(Jobson, 1980; Thompson, 1984). 이의 대안으로 Eulerian기법의 어려움을 제거할 수 있는 Lagrangian Reference Frame을 들 수 있다.

Lagrangian Transport Modeling은 수체(Parcel)의 형태로 하천의 흐름에 따라 계산상의 절점이 이동한다. 따라서 Parcel에 대한 추적은 많은 량의 부기(bookkeeping)와 같은 계산을 필요로 하지만 대류-확산 방정식(convection-dispersion equation)에서 대류항을 제거시킬 수 있다. Parcel이 점원(point source)이나, 비점원(non-point source)을 통과할 때 유입된 오염물질은 수체에서 균등하게 혼합되고 새로운 Parcel의 농도를 형성하게 된다.

LTM은 정류나 부정류에 대하여 모의할 수 있으며 변수의 경계조건이나 부하량을 계산할 수 있다. 또한 Time-Dependent Data System의 Data Base나 별도의 개별입력 File을 이용할 수 있으며, 흐름추적 모형과 연결시킬 수 있다.

수질반응은 QUAL2 수질예측 모형(Roesner and others, 1981a, 1981b)의 반응활동(reaction kinetic)을 이용하고 있다.

Parcel Tracking은 대류항을 설명하기위해 사용되지만 흐름영역을 우선 알아야 한다. LTM에 대한 흐름영역을 정의하기 위해 Boundary와 Source/Sink Discharges, 각 격점에서의 하천 단면적, 수면폭등이 필요하다. 두개의 인접한 격자점 사이의 하천 구간으로 정의된 모든 구획에 대한 평균 단면적과 수면폭을 계산하며 평균유속을 결정하게 된다.

부정류의 흐름에 대해서는 모든 격자점에 대한 거리가 초기에 주어지며 영을 갖는 시작시점으로부터 매시간 단계마다 각 격자점의 수리학적 자료(유속, 하천 단면적, 수면폭, 부하량 및 소멸량 등)를 필요로 한다.

Lagrangian Reference Frame의 연속방정식(continuity of mass equation)은 다음과 같으며

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} [D \frac{\partial C}{\partial \xi}] + S + \theta + K(C - CR) \dots \dots \dots (1)$$

여기서, C는 농도, t는 시간, D는 하류방향으로의 확산계수, K는 물질의 반응계수, CR은 평형상태의 농도, θ 는 지류유입에 따른 농도의 변화율, S는 직접유입등에 의한 농도변화율, ξ 는 Lagrangian 거리좌표로서 다음과 같이 주어진다.

$$\xi = X - X_0 - \int_{t_0}^t u dt' \dots \dots \dots (2)$$

여기서, X 는 하천에 따른 Eulerian (stationary) 거리좌표이며, u 는 단면평균유속, X_0 는 시간 t_0 에서의 Parcel의 위치이다.

식(1)은 Eulerian Reference Frame(Schoellhamer and Jobson, 1986)의 질량보존의 법칙 (conservation of mass equation)과 유사하나 Convection항은 갖고 있지 않으며, 하천흐름 방향 좌표 ξ 가 정의 되어 있는 것이 다르다. Lagrangian Reference Frame은 Eulerian 모형보다 정확도 및 내삽(interpolation)등에서 계산상의 장점(Jobson, 1980, Thompson, 1984)이 있다.

식(1)은 각각의 수질요소에 대해 정의할 수 있으며, 이들을 하나의 식으로 나타내면

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[D \frac{\partial C_i}{\partial \xi} \right] + S_i + \theta_i + \sum_{n=1}^m K_{i,n} (C_n + CR_{i,n}) \dots \dots \dots (3)$$

여기서, i 은 수질요소를 나타낸다. 이식에서는 수질인자간의 상호반응을 나타낼 수 있는데 $K_{i,n}$ 은 수질요소 n 의 존재에 따른 수질요소 i 이 생성되는 계수이며 $CR_{i,n}$ 은 수질요소 n 의 소멸에 따른 수질요소 i 의 생성에 관계되는 n 의 농도이다. 이때 시간간격 Δt 에 대한 식(3)의 적분은 다음식과 같다.

$$C_i(t+\Delta t) = C_i(t) + \frac{\partial}{\partial \xi} \int_t^{t+\Delta t} D \frac{\partial C_i}{\partial \xi} dt + \int_t^{t+\Delta t} \theta_i dt + \int_t^{t+\Delta t} \left[S_i + \sum_{n=1}^m K_{i,n} (C_n - CR_{i,n}) \right] dt \dots \dots \dots (4)$$

위식의 각항은 시간간격 Δt 동안의 Parcel의 농도변화를 나타내며 각 적분항의 총합이 각각의 물질의 농도변화를 나타낸다. 식(1)부터 (4)는 단일의 Parcel에 적용할 수 있으나 직접 시간과 공간적으로 농도의 변화를 계산하지는 못한다. Parcel이 완전히 혼합되었다고 가정하면 Volume은 지류유입에 의해 변한다. 하천구획에서의 농도의 변화는 $u\Delta t$ 의 거리간격으로 하천을 따라 정해진 Parcel들에 대해 식(1)의 해를 얻으므로 구할 수 있다.

2.2 1차원 부정류 흐름(1-Dimensional Unsteady-state Flow)

몇가지 한정된 가정을 이용하면 개수로에서의 1차원 부정류 흐름에 대한 방정식을 유도할 수 있다. 이 방정식은 이용되는 종속변수의 선택에 따라 방정식의 복잡성(complexity)이 결정되며, 중요도가 낮은 변수들을 제거할 수 있다.

개수로에서의 1차원 부정류 흐름은 단면적에 따른 유속은 일정하며, 수표면은 수평을 이루고 흐름은 점변류(gradually varied flow)이며, 수직 가속도는 무시할 수 있고, 정수압이 작용하는 것으로 가정 할 수 있다. 이와같은 가정하에서 흐름은 2개의 종속변수로 설명되어지는데, 유량(Q), 혹은 유속(V)그리고, 수표면 표고(Z), 수심(H) 혹은 단면적(A)에 대하여 거리(X), 시간(t)에 따라 다음의 지배 방정식을 이용하면 계산할 수 있다. 이와같은 변수들을 짝으로 가지고 있는 방정식은 질량보존의 법칙(principle of conservation of mass)과 운동량 방정식(momentum equation)으로 유도할 수 있다. 이 두 방정식은 적분형태에서 연속 및 불연속 흐름에 대해 적용할 수 있는데, 종속변수가 연속미분함수라 가정하면 부정류에 대한 미분 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} = q_i \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q_2}{A} \right)}{\partial X} + gA \frac{\partial Y}{\partial X} = gAS_f + q_1 v_1 \dots \dots \dots (6)$$

여기서, g는 중력가속도, q₁는 단위 구간당 Lateral Inflow 그리고 v₁은 Lateral Inflow의 유속을 나타내며, S_f는 에너지 구배이다.

2.3 QUAL2 모형

본 모형에서 이용하고 있는 QUAL2 모형은 간략화된 형태로 수온을 모의할 수 있으며, Algae, Ammonia Nitrogen, Nitrite Nitrogen, Nitrate Nitrogen, Dissolved Othrophosphate, BOD, Dissolved Oxygen 및 Coliform을 모의할 수 있다. 이중 DO에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(OXYG)}{\partial t} = DIS + S_8 + XK_{8,2} \cdot ALGE + XK_{8,3} \cdot NH_3 + XK_{8,4} \cdot NO_2 + XK_{8,7} \cdot BOD + XK_{8,8}(OXYG - CR_{8,8}) \dots \dots \dots (7)$$

여기서, DIS는 확산항, S₈는 Source항, XK_{8,2}는 Algae 농도에 의한 DO 교환율, XK_{8,3}는 Ammonia Nitrogen농도에 의한 DO 교환율, XK_{8,4}는 Nitrite Nitrogen 농도에 의한 DO 교환율, XK_{8,7}는 Othrophosphate 농도에 의한 DO 교환율, XK_{8,8}는 BOD농도에 의한 산소 교환율, OXYG는 DO 농도, CR_{8,8}는 수온에 지배되는 포화 용존산소 농도이다.

Oxygen Source항인 S₈은

$$S_8 = -A \cdot CK_{n,i} / 24. \dots \dots \dots (8)$$

여기서, CK_{n,i}는 Branch n과 Reach i에 대한 BOD Benthic Source율, A는 Branch n과 Reach i에 대한 단면적이며, 상수 24.는 일단위 계수의 시간단위 계수로의 변화량이다.

Algae에 의한 산소생성율은

$$XK_{8,2} = (ALPHA3 \cdot GRO - ALPHA4 \cdot TRSPRT) / 24. \dots \dots \dots (9)$$

여기서, ALPHA3는 단위 Algae성장 단위량당 산소생성량, GRO는 Algae의 성장율, ALPHA4는 Algae호흡에 의한 산소 소모량, TRSPRT는 Algae소멸율이다.

산소 재포기계수 XK_{8,8}는

$$XK_{8,8} = -CK_{2n,i} \cdot 1.0159^{(TEMP-20)} / 24. \dots \dots \dots (10)$$

여기서, CK_{2n,i}는 Branch n과 Reach i에 대한 재포기계수, TEMP는 수온이다. DO의 평형상태농도는 Saturation농도로 다음식과 같으며,

$$CR_{8,8} = 24.89 - 0.426 \cdot PTF + 0.00373 \cdot PTF^2 - 0.0000133 \cdot PTF^3 \dots \dots \dots (11)$$

여기서, PTF는 °F로 나타낸 수온이다.

3. 모형의 구성 및 적용

본 연구에서 모형을 적용하기 위한 대상지역은 남한강수계의 충주조정지댐 직하류에서 팔당댐유입지점까지 20개의 Reach로 구분하고 각각의 Reach를 구성하는 Element는 1Km단위로 나누어 총 115개의 Element로 구성하였다. 29개의 Pointload와 각 구간에대한 Lateral Inflow를 고려하였으며 BLTM에서 필요로하는 수리량을 계산하기위해 Choi(1991)에 의해 2.2절의 지배 방정식을 근간으로 Four-Point Implicit Formulation으로 만들어진 모형을 이용하여 각각의 Element에 대하여 시간단위로 모의하였다.

본 모형에서는 10개항의 수질인자에 대한 모의가 가능하며 실제 모의한 수질인자는 수온, Algae, NH₃, NO₂, NO₃, Phosphorous, BOD, Oxygen 등 8개의 수질인자를 모의하였다.

BLTM의 개념에 의하면 각각의 시간단계에서 각각의 Parcel에서의 각각의 수질인자는 식(4)를 수학적으로 해결하는 것이다. 각 구획(branch)의 상류측 끝으로 유입되는 유량은 새로운 Parcel을 구성하고 각각의 구획(branch)으로 부터 방류되는 물은 이 수체가 다른 구획(branch)로 들어가기전 다른 유입수와 함께 혼합되어 새로운 수질농도를 이룬다. 위치에 따라 결정되는 Reaction과 Source율은 Parcel의 상류측 경계조건에 의해 지배되는 구간(reach)에서 구간의 평균조건에 기초하여 전 Parcel에 대하여 결정하게 된다. 이와같은 현상은 모형에서 여러가지 구간(reach)으로 간격을 나누는 Parcel을 구성하며, 반응율은 상류 Parcel Boundary가 각 Grid Point를 통과할 때 새롭게 계산된다. Time Step이 끝나기전 Branch로부터 방류되는 Parcel은 Branch의 마지막 Sub-branch에서의 조건에 따른 Time Step의 나머지 구간에 대해 Reaction율을 계산한다. 합류점(Junction)을 통과하는 질량은 다음 Branch로 들어가기전 혼합되며 따라서 수치적으로 결정하는 Dispersion이 이 합류점에서 일어난다.

BLTM에서는 각 시간 단계에서의 수리조건에 대한 값들은 외부로부터 입력되어져야 하며 매 Grid에서는 방류량(discharge), 단면적(cross-sectional area), 수표면폭(top width) 그리고 지류유입량(tributary inflow)이다.

Dispersion에 대한 적분은 Explicit Finite Difference Approximation을 이용함으로써 구할 수 있는데,

$$\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial C}{\partial \xi} [D \frac{\partial C}{\partial \xi}] dt = \frac{|Q|\Delta t}{PV} [D_f^+(c^+ - c) - D_f^-(c - c^-)] \dots \dots \dots (12)$$

여기서, Q는 유하량, PV는 Parcel 체적, Δt는 시간구획, D_f⁺와 D_f⁻는 Parcel의 상류 및 하류측 끝점에서의 무차원 확산계수(dimensionless dispersion factor)이며, c⁺와 c⁻는 Parcel의 상류와 하류에서의 농도이다.

무차원 확산계수 D_f는

$$D_f = \frac{D}{|u|\Delta x} \dots \dots \dots (13)$$

로서 Δx는 Parcel의 길이이며, D_f는 방류량에 대한 Parcel간의 혼합율이며 Peclet Number 이다. Steady Flow에 대해 D가 주어지면 ΔX = |u|Δt는 D_f의 계산을 가능케하며, Unsteady Flow에 대해서는 D와 u가 주어지면 구할 수 있다.

Reaction Kinetic은 문제에 따라서 다양하게 변하지만 BLTM에서는 사용자가 제공하는 Kinetic을 이용할 수 있으며, 식(4)의 S_i, K_{i,n}과 CR_{i,n}의 값에 의하여 특별한 Reaction Kinetic이

지배된다. 이와같은 계수들은 보통 Zero로 주어져 있으며, 필요에 따라 상수 혹은 변수로 제공될 수 있다. 본 모형에서는 이를 위해 Roesner 등(1981a, 19781)에 의한 QUAL2 모형의 Reaction Kinetic을 이용하였으며, DO, BOD 및 Nitrogen Cycle에 대해서는 Jobson(1985)의 것이 이용되었다.

BLTM은 Unsteady 형태의 개수로 Network Flow에서 10개의 수질항목에 대하여 모의할 수 있다. 이 모형의 제약점은 1차원 흐름에 대해서만 모의가 가능하며, Stratified Flow 나 Unfixed Channel Geometry에 대해서는 모의할 수 없다.

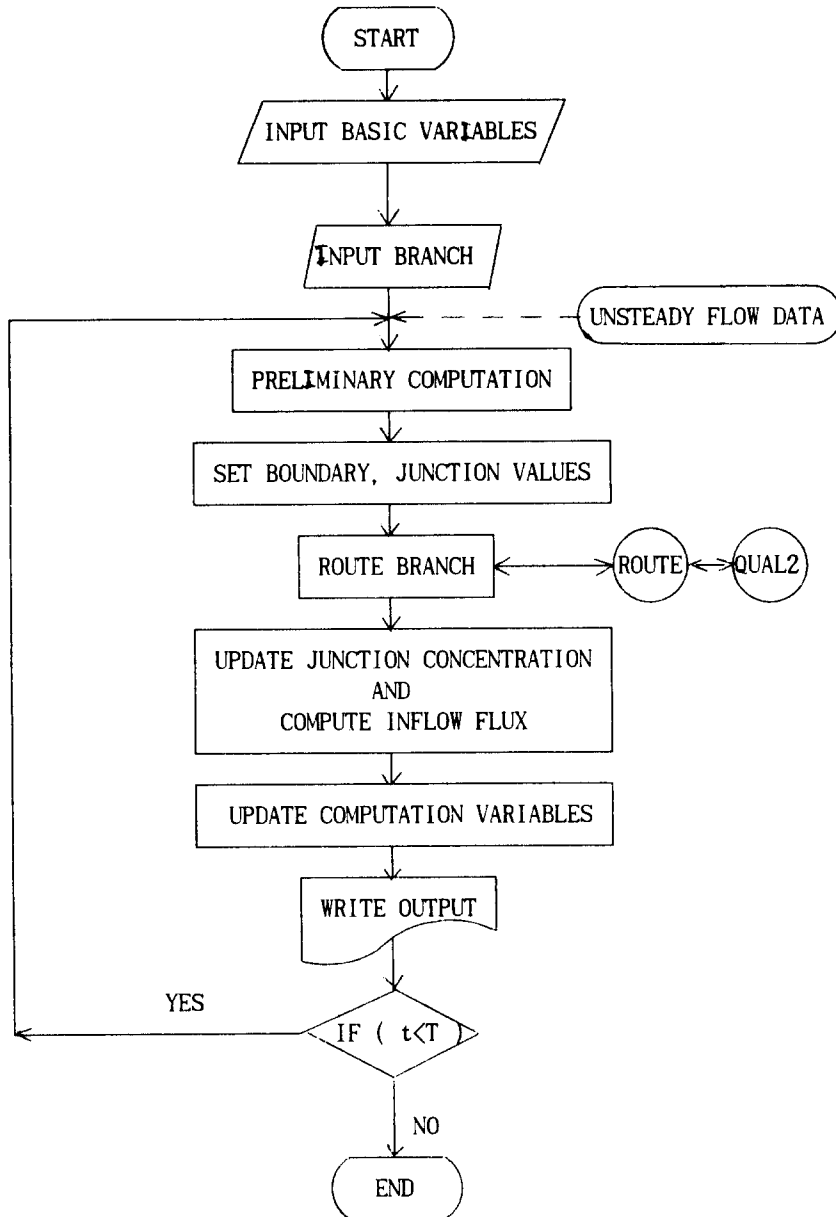


그림. 부정류 수리량에 따른 수질예측을 위한 BLTM의 구성도

참 고 문 헌

- Streeter, H. W., and E. B. Phelps, "A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River", Bull. 146, U. S. Public Health Serv., Washington, D.C., 1925.
- Jobson, H. E., and D. H. Schoellhamer, "User Manual for a Branched Lagrangian Transport Model", U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 1987.
- Jobson, H. E., "Comment on A New Collocation Method for the Solution of the Convection-Dominated Transport Equation, by Pinder, George E. and Shapiro, Allen, 1979",
Water Resources Research, Vol.15, No.5, pp. 1177-1182; Water Resources Research, Vol.16,
pp. 1135-1136, 1980.
- Thomson, N. R., J. F. Sykes and W. C. Lennox, "A Lagrangian Porous Media Mass Transport Model" Water Resources Research, Vol.20, No.3, pp.391-399, 1984.
- Roesner, L. A., P. R. Giguere, and D. E. Evenson, "Computer Program Documentation for Stream Quality Modeling(QUAL-2)", U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA, EPA-600/9-81-014, 1981.
- Roesner, L. A., P. R. Giguere, and D. E. Evenson, "User's Manual for Stream Quality Model(QUAL-2)", U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA, EPA-600/9-81-015, 1981.
- Schoellhamer, D. H., and H. E. Jobson, "Programmers Manual for a One-dimensional Lagrangian Transport Model", U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report
86-4144, pp101, 1986.
- Jobson, H. E., "Simulating Unsteady Transport of Nitrogen, Biochemical Oxygen Demand, and Dissolved Oxygen in the Chatlahoochee River Downstream from Atlanta, Georgia", U.S. Geological Survey Water Supply Paper, No.2264, pp.36, 1985.
- 한국수자원공사, 수량 및 수질을 고려한 저수지군의 종합관리 방안 개발(1차), 1992.