

환경용량을 고려한 유역 오염부하삭감량 추정 연구

정재성* · 박영기[†] · 김종국**

국립 익산대학 건설환경과 · *순천대학교 토목환경공학부 · **전북대학교 환경·화학공학부

(2006년 7월 5일 접수, 2006년 12월 4일 채택)

An Estimation Study of Watershed Pollution Load Reduction Using Environmental Capacity

Jae Sung Jung* · Young Ki Park[†] · Jong Guk Kim**

Department of Civil and Environmental Engineering, Iksan National College

*School of Civil and Environmental Engineering, Suncheon National University

**Division of Environmental and Chemical Engineering, Chonbuk National University

ABSTRACT : The environmental capacity and watershed pollution load reduction of Yongdam reservoir were estimated by the simulation of water quality variation process with the target water quality establishment, pollution load estimation and flow analysis. The potable raw water I~II, COD 1.0~3.0 mg/L and TP 0.01~0.03 mg/L were selected as the target water quality. Yongdam reservoir water quality model was constructed with WASP5 contained 42 segments and the correlation of calibrated results were BOD 0.73, PO₄-P 0.98. The environmental capacity for target quality COD 2.0 mg/L and TP 0.02 mg/L were BOD 131,880~4,694 kg/d, TP 7,855~167 kg/d which were less than exists, and the related reduction ratios were BOD 51~62%, TP 47~67% which were middle amount in exists. The load reduction ratios to meet the potable raw water I~II were BOD 72~16%, TP 78~36% in existing conditions and BOD 81~44%, TP 84~52% in new conditions. BOD was the least one and TP was the second least in 4 results. The effects of the load reduction assignment to subbasin were dominant in TP but little in COD.

Key Words : Environmental Capacity, Pollution Load Reduction, WASP5, Yongdam Reservoir

요약 : 용담댐 저수지에 대하여 목표수질 설정과 오염물질 부하량 추정 및 유량분석을 실시하여 수질의 변화과정을 모의함으로써 환경용량과 오염부하삭감량을 추정하였다. 목표수질은 상수원수 1~2등급, COD 1.0~3.0 mg/L와 TP 0.01~0.03 mg/L로 설정하고, 용담댐 저수지의 수질모형을 42개 소구획을 가진 WASP5로 구성하고, 보정하여 측정치와 계산치의 상관계수는 BOD 0.73, PO₄-P 0.98이었다. 목표수질 COD 2.0 mg/L와 TP 0.02 mg/L에 대한 환경용량은 연구조건에 따라 BOD 131,880~4,694 kg/일, TP 7,855~167 kg/일이고, 각 경우의 오염부하 삭감률은 BOD 51~62%, TP 47~67%로 나타났다. 환경용량은 기존연구보다 작게 추정되었고 삭감부하율은 기존결과들의 중간에 해당하였다. 상수원수 1~2등급의 수질을 연중 달성할 오염부하 삭감률은 기존 연구조건에서 BOD 72~16%, TP 78~36%이고, 신규 연구조건에서 BOD 81~44%, TP 84~52%로 나타났다. 기존연구의 삭감량과 비교하면 BOD는 가장 적고 TP는 4개 중 2번째로 적었다. 목표삭감부하량의 소구역별 배분에서 TP는 취수탑 구획에 대한 근접도의 영향이 크게 나타났으나 COD는 별다른 차이가 없었다.

주제어 : 환경용량, 오염부하삭감량, WASP5 모형, 용담댐 저수지

1. 서론

대규모 댐은 유입량에 비하여 저수용량이 매우 커서 유입수의 평균 체류시간이 2~3년에 달하는 경우가 많으므로 저류된 물의 수량관리와 병행한 수질관리가 적절히 이루어져야 양질의 풍부한 물을 지속적으로 사용할 수 있다. 댐 저수지의 수질관리를 위해서는 유역의 오염물질 부하량과 저수지 내 수질변화의 관측결과에 근거하여 오염원을 관리하여야 한다. 즉 대상 저수지가 목표수질을 유지하면서 부담할 수 있는 오염부하량인 환경용량을 추정하고 이를 저수지로 유입되는 유

역 배출부하량과 비교하여 삭감부하량을 결정해서, 목표수질을 유지할 수 있도록 유역 내 오염물질 배출부하량을 조절하여야 한다.

저수지의 환경용량과 삭감부하량을 추정하기 위해서는 저수지 유입량과 오염부하량의 다양한 조건들에 대한 저수지 수질변화를 파악하여야 한다. 이러한 조건별 저수지 수질변화는 흐름 현상과 물질의 이송, 확산, 반응 등이 복잡하게 상호작용한 결과이며 이를 파악하기 위한 가장 일반적인 방법이 수질모형 이용이다.

본 연구에서는 전주권을 포함한 서해안 지역의 용수를 공급하고 있는 용담댐 저수지를 대상으로 수질모형을 이용하여 환경용량을 산정하고 목표수질 달성에 필요한 오염부하삭감량 추정을 연구하였다. 연구대상인 용담댐 저수지의 수질모

[†] Corresponding author
E-mail: parkyk@iksan.ac.kr
Tel: 063-850-0797

Fax: 063-850-0792

의에 대한 기존 연구들은 다음과 같다. 한국수자원공사¹⁾는 용담댐하류에 위치한 대청댐의 1997년 실측유입량을 유역면적비로 환산한 유입량과 하천수질 자료를 CE-QUAL-W2 모형에 적용하여 용담댐저수지 수질을 모의하고, 모형결과에 기존자료의 비례관계를 적용하여 저류수의 수질을 추정하였다. 한국수자원공사²⁾는 용담댐 상류 용담수위표 '63~'90 측정유량에서 환산한 평균 유입량과 하천수질을 WASP5 모형에 적용하였는데 모형 매개변수는 대청호에서 보정된 결과를 인용하였다. 국립환경연구원³⁾은 용담댐 지점 1999년 실측유량과 비거리 유달계수를 이용해 산정한 유달부하량을 WASP5 모형에 적용하여 매개변수를 보정하였다. 전라북도보전환경연구원⁴⁾은 용담수위표 '63~'90 측정유량에서 환산한 평균 유입량과 점오염원에 의한 유달부하량을 WASP5 모형에 적용하여 매개변수를 보정하였다. 천승규 등⁵⁾은 금강수계의 68개 배수구역별 오염부하발생량과 삭감량을 산출하고 선형계획법을 이용하여 삭감량 할당방법을 연구하였다.

기존연구들은 용담댐이 정상적으로 운영되기 이전에 측정된 하천수질자료만을 근거로 수질모의를 실시하였는데 본 연구에서는 용담댐 저수지의 운영실적과 하천유량 및 수질 조사 결과 등을 수질모형 WASP5에 적용하여 모형상수들을 보정하여 보다 현실적인 수질모의를 하고자 하였다. 전체 저수지구간의 모의에 필요한 특성자료들의 조사 및 결정의 편의와 기존결과와의 비교를 위해 CE-QUAL-W2 보다 WASP5가 적합하다고 판단하였다. 용담댐 유역의 기존 유량조사실적과 저수지 운영계획을 검토하여 장래의 댐 유입량과 방류량을 추정하고 오염물질 유달부하량 산정결과와 저수지 수질측정 결과를 반영하여 호소의 환경용량을 산정하였다. 또한, 유달부하량이 환경용량을 초과할 경우 목표수질 달성을 위해 삭감해야 하는 초과부하량을 추정하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구절차

용담댐 저수지의 현황을 조사하여 저수지경계를 설정하고 유입하천 및 저수지 수질측정 결과와 수질기준을 검토하여 환경용량 산정을 위한 목표수질과 기준물질을 선정하였다. 용담댐 저수지의 수리·수문특성을 수질모형 WASP5에 적용하여 용담댐 저수지 환경용량을 추정을 위한 모의시스템을 구축하였다. 용담댐 저수지 수체를 3층 42개 구역으로 분할하고 기존 유량조사실적을 검토하여 모의대상 용담댐 저수지 유입량을 결정하였고 용수공급계획을 검토하여 용담댐 저수지 방류량을 결정하였다. 목표수질과 수질모형에 반영된 자정작용의 결과로부터 용담댐 저수지의 환경용량을 산정하고 용담댐 저수지유역 배출부하량에 다양한 삭감률을 적용하여 환경용량을 초과하지 않음 용담댐 저수지 오염부하의 목표 삭감량을 추정하였다.

2.2. 연구내용

2.2.1. 대상유역 현황과 목표수질

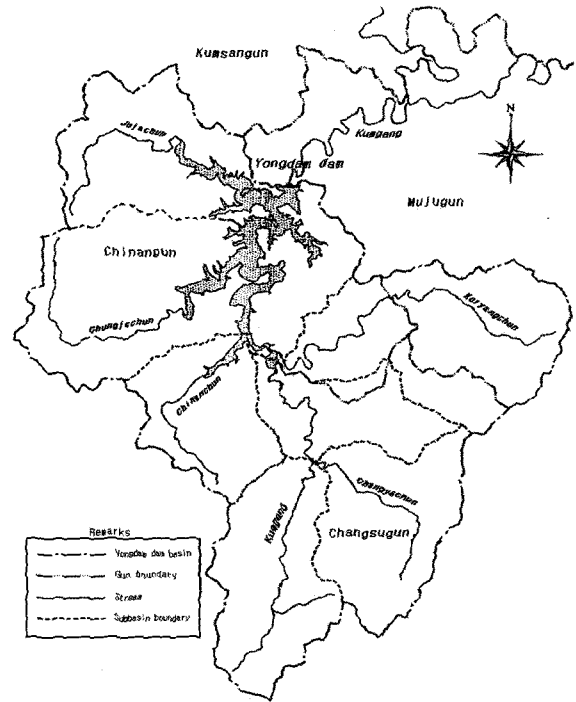


Fig. 1. Basin map of Yongdam dam.

Fig. 1에 도시한 용담댐 유역은 북위 35°35'~36°00'와 동경 127°20'~127°45'에 걸친 금강유역 최상류에 위치해 있고, 댐 유역면적 930 km²는 금강유역 9,886 km²의 약 9.45%에 상당한다. 유역의 고도는 최저 EL.205.4 m에서 최고 EL.1,587 m까지의 범위를 가지며, 용담댐 만수위가 EL.263.5 m로 유역 전체가 고지대에 위치한다. 댐 지점의 주하천 길이는 53.3 km이고, 총저수용량 815 MCM, 유효저수용량 672 MCM을 가지고 있다.^{6,7)}

기존 조사자료^{3,4)}에 의하면 1996년 이후 용담댐 유역 내 BOD와 COD는 큰 변화를 보이지 않고 있으나 인과 질소는 계속 증가하고 있어 부영양화 현상 발생의 우려가 크지만 그에 대한 대책이 충분치 못하다. 현재의 수질대책으로 예상되는 용담댐의 수질은 COD 기준 2급수, TN 기준 5급수 초과, TP 기준 3급수로 나타났다.

용담댐 저수지 내의 2002년 COD 농도는 표층의 경우 정자천 합류부가 2.74 mg/L로 가장 높았고, 하층은 주자천 합류부가 1.20 mg/L로 가장 낮았다. 조사기간 중에 나타난 COD 농도 변화는 최소 0.20 mg/L에서 최대 4.32 mg/L로 조사되었다. 저수지 내 TN의 평균농도는 호소수질기준 V등급에 해당하는 1.42 mg/L 정도로 유입지천보다 높은 값으로 나타났다. 저수지 내 TP의 평균 농도는 표층이 0.04~0.13 mg/L, 하층이 0.09~0.11 mg/L, 유입지천은 0.07~0.27 mg/L의 범위로 나타났다.⁷⁾

용담댐 저수지의 목표수질을 건설부·한국수자원공사⁸⁾는 COD 1.0 mg/L, TP 0.01 mg/L 이하인 상수원수 1등급을 제시하였고, 정부합동⁹⁾은 COD 2.0 mg/L 이하를 제시하였다. 한국수자원공사¹⁾는 COD 1.0 mg/L, TP 0.02 mg/L 이하를 목표수질로 정하였고, 한국수자원공사²⁾는 연평균으로 COD 1.0

mg/L, TP 0.02 mg/L 이하, 월평균 최대치 COD 2.0 mg/L, TP 0.03 mg/L 이하로 정하였다.

이와 같이 용담댐 저수지의 목표수질은 당초에는 상수원수 1급수를 기준으로 하였으나, 수물지역 지장물 철거와 환경기초시설 완비, 오염원 관리 등의 어려움과 대규모 저수지에서 홍수기에 다량의 비점오염부하가 유입되어 축적되는 현상에 따른 수질악화를 고려하면 상수원수 2급수에 대해서도 검토가 필요하다. 따라서 상수원수 1등급~2등급을 목표수질로 검토하였다.

용담댐 저수지의 수질등급에 가장 많은 영향을 미치고 있고 부영양화를 유발하는 중요한 영양염류는 TN과 TP라 할 수 있는데, 질소의 경우에는 토양 및 강우 등과 같은 비점오염원에 의하여 유입되는 양이 전체 오염부하량 중 상당부분을 점유하고 있기 때문에 수질관리 측면에서는 상대적으로 비점오염원의 비중이 적은 TN을 선정하여 관리하는 것이 효율적이라 할 수 있고, 호소수질기준은 BOD 대신 COD를 제시하고 있으므로 목표수질 기준물질을 COD와 TP로 선정하였다.

2.2.2. 수질모의시스템 구축

저수지 환경용량은 목표수질의 유지가 가능한 조건에서 수용할 수 있는 최대 오염부하량이므로, 저수지 유입유량과 용수공급 등 저수지 운영실적에 따른 저수지 운영의 수문학적 조건과 유입 오염부하의 수체내 이송, 확산 및 수질반응 현상을 분석하여 추정하여야 한다. 따라서, 환경용량을 추정하기 위해서는 저수지의 수량과 수질을 동시에 모의할 수 있는 수질예측모형을 이용하여야 하며, 본 연구에서는 국내 호소 수질모의에 많이 이용되고 있는 2차원 호소 수질모형 WASP5를 채택하였다.¹⁰⁾

(1) WASP5의 물질수지식

WASP5 모형을 구성하고 있는 수체내 용존물질에 대한 물질수지 방정식(mass balance equation)은 식 (1)과 같이 유동에 의한 이송효과, 확산에 의한 효과, 생·화학적 변화, 외부로부터의 부하 등을 고려한다.¹¹⁾

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(U_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(U_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(U_z C) + \frac{\partial}{\partial x}(E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(E_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(E_z \frac{\partial C}{\partial z}) + S_L + S_B + S_K \quad (1)$$

여기서 C는 수질항목의 농도(g/m³), t는 시간(day), U_x, U_y, U_z는 x, y, z 방향의 유속(m/day), E_x, E_y, E_z는 x, y, z 방향의 확산계수(m²/day), S_L은 직접부하량(g/m³·day), S_B는 경계에서의 부하량(g/m³·day), S_K는 내부변환량(g/m³·day)이다.

(2) 모의 일반조건

수자원공사¹⁾는 용담댐 저수지를 3층 48구획으로 분할하였고, 수자원공사²⁾와 국립환경연구원³⁾은 3층 42구획, 전라북도보건환경연구원⁴⁾은 4층 70구획으로 분할하였는데, 본 연구에서는 용담댐 저수지에서 본류에 해당하는 구간을 상층 16개, 중층과 저층 각각 13개로 구성된 42개 구획으로 Fig. 2와 같이 분할하였다. Fig. 2에서 구획 1~3 부분은 수심이 작아 1층으로 구성하고, 다른 부분은 3층으로 구성하였다.

모의 수질항목은 부영양화 현상을 분석할 수 있도록 DO, BOD, Chl-a, NH₃-N, NO₃-N, Organic-N, PO₄-P, Organic-P로 하였고, 계산시간간격은 0.1일, 출력시간간격은 5일로 설정하였다. 호소 수질기준에는 COD와 TP가 제시되어 있으나 WASP 모형으로는 이들 변수를 직접 모의할 수 없으므로 BOD,

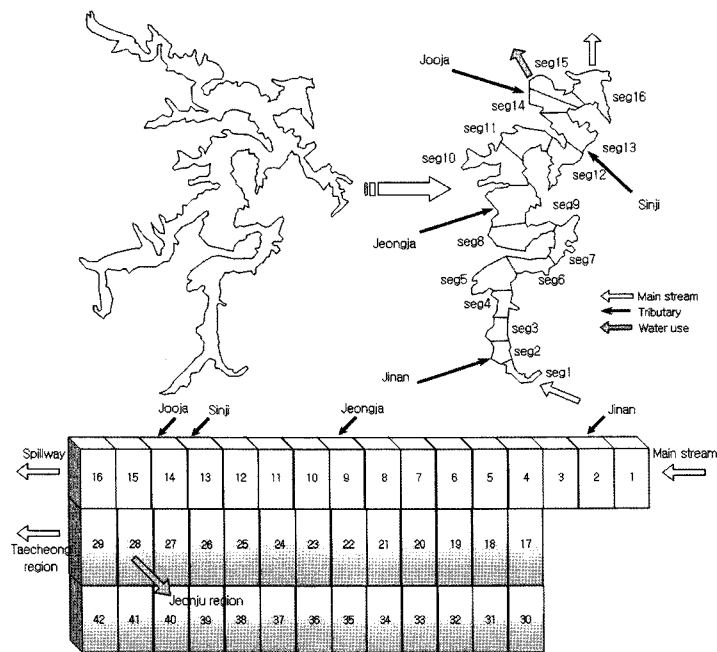


Fig. 2. Cell partition for Yongdam reservoir modeling.

PO₄-P, Organic-P를 모의하여 그로부터 COD와 TP를 추정하였다. 용담댐 수질모형의 매개변수 보정은 전주권 용수의 취수탑이 위치한 소구획 28을 중심으로 수행하였는데 이는 용담댐 저수지의 물이용에 가장 직접적으로 영향을 미치는 구획이기 때문이다.

(3) 모의유량

용담댐 수질모형의 모의유량은 수질모형 보정용과 장래수질 예측용이 필요하며, 각각의 경우에 대해 댐 유입량과 용수공급량, 방류량으로 구성된다. 댐 유입량은 Fig. 1에 제시한 본류와 지류하천별 유입유량으로 구분하여야 한다. 본 연구에서는 총유입량을 Fig. 2에 제시된 금강 본류와 진안천, 정자천, 신지천, 주자천으로 구분하여 모의하였다.

수질모형 보정용 모의유량은 2002년 8월부터 2003년 7월까지 측정된 댐유입량과 금강본류 및 4개 지류의 하천유량을 이용하였고, 장래수질 예측용 모의유량은 장기간 측정자료를 이용하는 것이 가장 좋으나 금강 본류 저수지구간에만 용담수위표가 있었고 지류유량은 2002년 이후부터 부분적으로 측정되어 과거자료를 이용한 추정이 필요하였다.

용담댐 저수지 총유입량을 용담댐 계획²⁾ 당시에는 용담수위표 지점 유량을 이용하여 1963년부터 1990년까지 용담댐 지점의 월단위 유량을 추정하였고, 이후 수자원 개발가능량조사¹²⁾에서는 1966년부터 1996년까지 월유량을 Tank 모형으로 추정하였다. 1991년부터 1998년까지는 댐 계획 및 건설기간으로 용담수위표의 관측자료가 없고, 1999년에 실측유량이 있으나 관측기간이 짧아 용담댐 유입량을 대표할 수 없으므로 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 1966년부터 2003년까지 조사된 유량의 평균치를 장래의 용담댐 유입량으로 설정하였다.

용수공급량과 댐방류량은 수질모형보정에는 해당기간의 운영실적을 적용하였고, 장래 조건에 대해서 수자원공사^{a)}는 전주권 공급량 15.6 CMS와 대청호 유입량과 비례하여 대청권 방류량을 적용하였고, 수자원공사^{b)}는 전주권 공급량 15.6 CMS와 대청권 방류량 5.0 CMS 이상을, 국립환경연구원³⁾은 전주권 공급량 15.6 CMS와 대청권 방류량 5.0 CMS, 여수로 방류량 45.04 CMS를, 전라북도보전환경연구원⁴⁾은 전주권 공급량 11.9 CMS와 대청권 방류량 8.7 CMS를 적용하였다. 본

연구에서는 용담댐 용수배분에 관한 연구실적¹³⁾에 근거하여 대청댐 유지용수 5.0 CMS와 2021년까지 전주권 생·공용수를 15.6 CMS로 하는 기존 연구조건과 전주권 생·공용수를 11.9 CMS로 하는 2가지 방안을 채택하였다. 여수로 방류량은 2003년도 운영실적과 같이 7월말 저류량이 484 MCM이 되는 조건에서 월단위 저수지운영을 실시하여 홍수기 제한수위를 초과하는 저류량으로 산정하였다.

(4) 모의부하량과 매개변수 보정

본류 및 지류유입 또는 용수공급 및 여수로 방류와 같이 유량의 출입이 있는 구획들에 대해서는 각 구획들의 수질농도를 시간함수로 입력하고 매개변수를 보정해야 하는데, 수자원공사^{a)}는 CE-QUAL-W2 모형으로 BOD, TN, TP를 추정하여 COD/BOD는 대청댐의 실측자료 비율 1.85를 적용하였고, 수자원공사^{b)}는 대청댐에서 보정된 WASP5 모형의 매개변수를 적용하고 COD/BOD는 1995~1999 대청댐 실측자료의 비율 2.265를 사용하였다. 국립환경연구원³⁾은 비거리 유달계수를 이용해 유달부하량을 산정하여 WASP5 모형의 매개변수를 보정하였고, COD추정은 “COD_{Mn} = [CBOD + Phyt-C × (O₂/C)] × 0.7”을 활용하였으며, 전라북도보전환경연구원⁴⁾은 점오염원에 의한 유달부하량만을 고려하여 WASP5 모형의 매개변수를 보정하였고, COD추정은 “COD_{Mn} = [CBOD + Chl-a × 30 × (O₂/C)] × R_{Mn}”을 활용하였다.

본 연구에서 보정용 자료의 부하량 경계조건은 2002~2003 실측수질자료를 적용하고^{7,14)} 장래 수질예측 자료는 용담댐공동조사위원회¹⁴⁾의 배출부하량에 비거리 유달계수법으로 유달부하량을 산정해 적용하였다. 유달부하량 W_f과 배출부하량 W_e 및 유달거리 L(km)의 관계는 식 (2)와 같으며, 비거리 유달계수 k와 단위유량(Q/A)는 식 (3)과 같이 선형관계를 가진다. 식 (3)의 단위유량은 월단위 저수지 운영결과를 이용하여 각 소구역별로 산정하였고 계수 a, b는 국립환경연구원³⁾과 동일한 값을 사용하였다.

$$k = a \ln(Q/A) + b \tag{2}$$

$$W_f = W_e \times \text{Exp}(-kL) \tag{3}$$

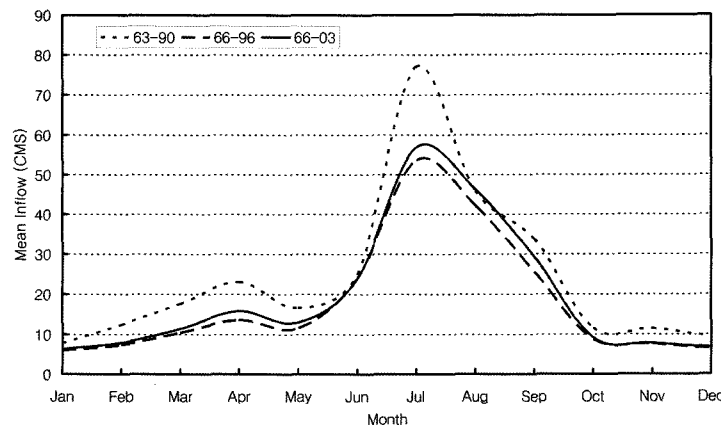


Fig. 3. Yongdam reservoir inflows used for water quality modeling.

용담댐 저수지는 2002년 7월 12일부터 정상적인 운영을 시작하여 기존의 매개변수 보정은 담수이전의 하천수질을 적용해야 하는 한계가 있었으므로, 본 연구에서는 2002년 8월부터 2003년 7월까지 용담댐 저수지의 실측수질을 이용하여 WASP5 모형의 매개변수를 보정하고, COD/BOD는 대청호 실측자료의 비율인 1.85를 사용하였다.

2.2.3. 환경용량과 삭감부하량 추정

용담댐 저수지의 환경용량은 2004년 현재 용담댐 저수지 유입하천별 오염부하배출 유형이 반복된다고 가정하여 호소수질기준의 상수원수 1~2등급 COD와 TP를 목표수질로 한 허용부하량으로 산정하였다.

삭감부하량은 기존연구의 유량조건^{1~3)}과 신규 유량조건¹²⁾을 각각에 대하여 산출하였다. 기존 연구조건인 용담수위표에서 환산된 월평균 유입량과 전주권 공급량 15.6 CMS, 대청권 하천유지용수 방류량 5.0 CMS, 8월 평균 여수로 방류량 45.04 CMS, 비거리 유달부하량을 적용한 결과는 기존 연구결과와 비교하였다. 신규 유량조건은 댐 계획당시부터 현재까지의 평균유량과 전주권 생·공용수량을 11.9 CMS로 설정했을 경우에 대한 용담댐 모의운명을 실시하여 대청권 공급량과 여수로방류량을 결정하고, 용담댐 저수지의 장래수질변화를 추정하였다.

오염부하삭감에 따른 수질개선 효과를 분석하기 위하여 관리대상 수질항목들의 오염부하를 전기간에 걸쳐 일정비율로 삭감하는 방법으로 삭감률에 따른 구획별 수질변화를 추정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 목표수질과 기준물질

용담댐 저수지의 목표수질을 용담댐 저수지 전체에서 만족시키면 수질개선에는 좋겠지만 목표삭감률 증가로 비용부담이 매우 커지므로 용담댐 용수이용계획에서 전주권 용수공

급을 위해 물을 취수하는 구획과 대청권 용수공급을 위해 방류하는 구획, 홍수기 여수로 방류가 이루어지는 구획을 목표수질을 적용할 대상수체의 위치로 검토하였다. 또한 전주권 취수탑 구획은 다른 구획들과 인접하여 있으므로 이 부분의 수질이 충족되면 대청댐으로 방류되는 물은 만족할 만한 수질을 유지할 수 있고 다소간의 수질저하가 일어난다 하더라도 대청호까지 유하하는 과정에서 자연정화가 일어난다는 사실을 고려하여, 용담댐 저수지의 취수탑 구획에서 목표수질을 달성하면 용담댐 저수지의 목표수질이 만족될 것으로 판단하였다.

환경용량 산정을 위한 기준물질은 유기물질에 대해서는 호소 수질기준에 제시된 COD를, 부영양화를 유발하는 영양염류에 대해서는 TP를 각각 선정하였다. 따라서 상수원수 1~2등급 기준인 COD 1.0~3.0 mg/L와 TP 0.01~0.03 mg/L를 용담댐 저수지내 취수탑 구획에서의 목표수질로 설정하였다.

3.2. 반응상수 보정

용담댐 저수지의 지형과 흐름구조를 WASP5에 입력하여 구성된 용담댐 수질모형에서 외부와 접하는 각 구획에서의 수질 항목별 농도의 시간함수는 댐내 실측 자료를 이용하였고, 측정성도가 없는 지점에서는 직상류와 직하류의 평균농도를 적용하거나 저수지내 측정성도의 평균을 적용하였다. 용담댐 수질모형의 반응상수들은 WASP5 설명서^{10,11)}에 제시된 일반적인 범위내에서 보정하고 주요상수들을 Table 1에 제시하였다.

BOD와 PO₄-P 농도의 모의결과는 소구획 28에서 Fig. 4와 같이 상관계수가 BOD 0.728, PO₄-P 0.982로 양호하게 나타났다. 모의결과에서 시간에 따른 농도 값의 일부가 측정치와 다르게 나타난 것은 모의기간중의 강수에 의한 유달부하 변화 및 기온강하, 상류지역의 오염물질 유입 등의 다양한 불확실성으로 인한 것이다. 특히, 초기의 불일치는 2002년 8월 태풍 루사와 집중호우로 인한 집중적인 오염부하^{6,7)}가 일반적인 반응과정을 변형시킨 결과로 판단되었다.

Table 1. Comparison of calibrated reaction constants in WASP5 model

Quality item	ID No.	Definition (Units)	General range [Default]	Last ⁴⁾ result	This result
NH ₃ -N	11	Nitrification rate at 20 °C(day ⁻¹)	0.09~0.13	0.12	0.09
NO ₃ -N	21	Denitrification rate at 20 °C(day ⁻¹)	-	0.09	0.09
Growth	41	Saturated growth rate f phytoplankton(day ⁻¹)	2.0	2.4	2.0
Light	47	Saturation light intensity for phytoplankton(Ly/day)	200~500	300	350
	50	Endogenous respiration rate of phytoplankton(day ⁻¹)	0.02~0.2	0.125	0.05
Death	55	Decomposition rate for phytoplankton in the sediment at 20 °C(day ⁻¹)	-	0.2	0.05
	57	Phosphorus-to-carbon ratio in phytoplankton(mgP/mgC)	0.01~0.047	0.025	0.025
Nutrient	58	Nitrogen-to-carbon ratio in phytoplankton(mgN/mgC)	0.1~0.48	0.25	0.25
CBOD	71	CBOD deoxygenation rate at 20 °C(day ⁻¹)	0.16~0.21	0.16	0.04
O ₂	81	Oxygen to carbon ratio in phytoplankton(mgO ₂ /mgC)	[2.67]	2.667	2.67
Org-N	91	Mineralization rate of dissolved organic nitrogen(day ⁻¹)	0.075	0.075	0.090
Org-P	100	Mineralization rate of dissolved organic phosphorus(day ⁻¹)	0.075	0.075	0.075

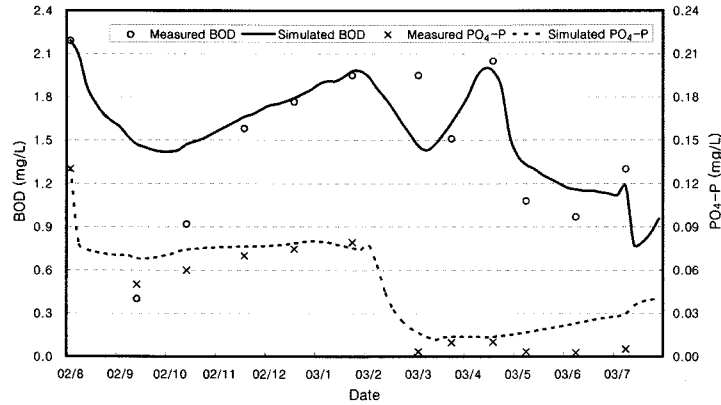


Fig. 4. Simulated concentrations of water pollution base materials at intake tower in Yongdam reservoir.

3.3. 환경용량 산정

용담댐 저수지의 환경용량은 전술한 COD, TP에 대한 호소수질기준 상수원수 1등급과 2등급의 중간을 목표수질로 한 허용부하량으로 산정하였는데, 모의조건은 기존연구¹⁻³⁾의 유량 및 수질조건과 신규 유량¹²⁾ 및 2002년 8월부터 2003년 7월까지 1년간 용담댐 저수지의 운영실적과 상류하천과 저수지에서 측정된 수질^{6,7)}을 적용한 2가지 경우로 구분하였다.

호소의 목표수질은 COD로 제시되어 있으나 오염부하량은 BOD로 조사되므로 COD기준 환경용량은 BOD로 구하였다. 용담댐 저수지 환경용량은 기존 연구조건에서 BOD 131,880 kg/일, TP 7,855 kg/일, 신규 연구조건에서 BOD 4,694 kg/일, TP 167 kg/일이고, 이 환경용량을 넘지 않는 부하량 삭감률은 기존 연구조건에서 BOD 50.5%, TP 47. %, 신규 연구조

건에서 BOD 62.3%, TP 67.0%로 나타났다. 이를 기존 연구결과와 비교하면 과거에는 유량과 오염부하량이 커서 환경용량이 대체로 크게 추정되었고, 본 연구의 삭감부하율은 과거 산정결과들의 중간에 해당하였다.

3.4. 기존연구의 수량 및 수질조건에 따른 삭감부하량 산정

기존 연구조건¹⁻³⁾에서 오염부하삭감에 따른 수질개선 효과를 파악하기 위하여 관리대상 수질항목들의 오염부하를 전기간에 걸쳐 일정비율로 삭감하는 방법으로 삭감률에 따른 구획별 수질변화를 파악하여 방류와 관련된 소구획부분을 Fig. 5 및 Fig. 6에 도시하였다. 그림에서 “Seg 16, Seg 28, Seg 29”는 각각 여수로방류, 전주권 용수공급, 대청권 유지용수

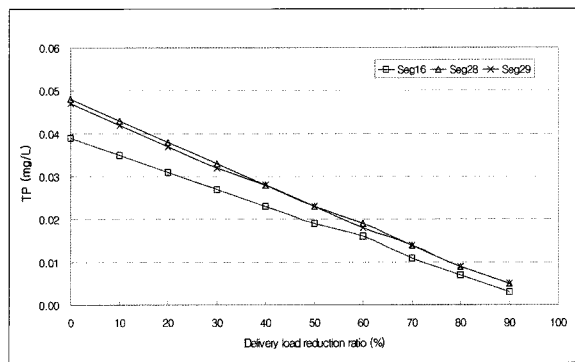
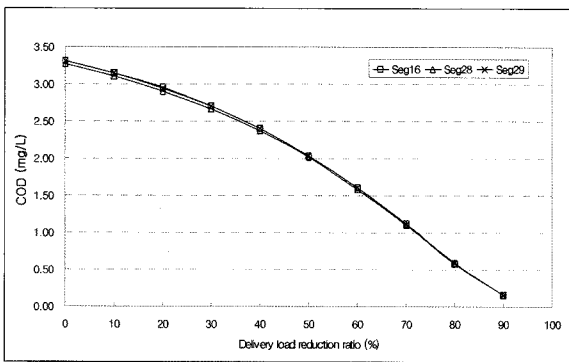


Fig. 5. Water quality improvement by inflow load reduction for all items.

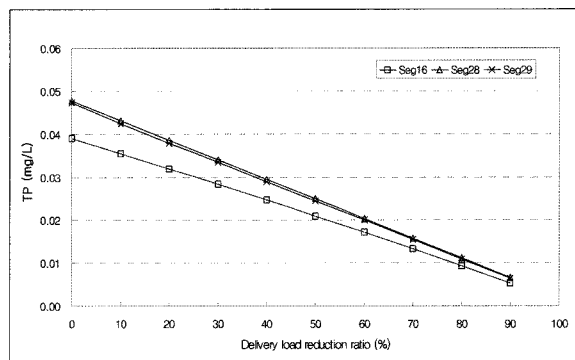
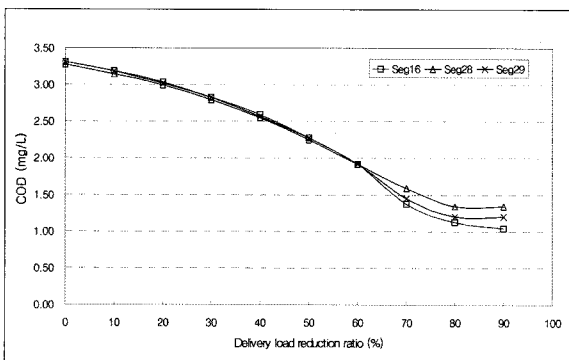


Fig. 6. Water quality improvement by inflow load reduction for each item.

Table 2. Yongdam reservoir's water quality improvement by pollution load reduction with existing research conditions

Quality item	Seg No.	Pollution load reduction ratio (%)										Remarks
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
COD (mg/L)	16	3.31	3.15	2.96	2.70	2.41	2.04	1.61	1.12	0.59	0.15	Max in Dec
	28	3.27	3.11	2.90	2.66	2.37	2.02	1.59	1.10	0.58	0.16	
	29	3.31	3.15	2.94	2.70	2.41	2.04	1.61	1.12	0.59	0.15	
	Grade*	III	III	II	II	II	II	II	II	I	I	
TP (mg/L)	16	0.039	0.035	0.031	0.027	0.023	0.019	0.016	0.011	0.007	0.003	Max in Aug
	28	0.048	0.043	0.038	0.033	0.028	0.023	0.019	0.014	0.009	0.005	
	29	0.047	0.042	0.037	0.032	0.028	0.023	0.018	0.014	0.009	0.005	
	Grade	III	III	III	III	II	II	II	II	I	I	

* : water quality grade for potable raw water

방류와 관련된 소구획을 의미하며, Fig. 5는 모형의 오염부하 관련 수질항목 전체를 동시에 삭감한 경우이고, Fig. 6은 오염부하관련 수질항목 중 해당항목만을 삭감한 경우이다.

오염부하 저감대책들이 특정항목만을 삭감하기는 어려우므로 전체항목 동시삭감에 따른 수질변화만 Table 2에 요약하여 제시하였다. Table 2에서 COD는 72.0% 삭감하여 1급수, 50.5% 삭감하여 2.0 mg/L, 15.5% 삭감하여 2급수 수질유지가 가능하고, TP는 77.8% 삭감하여 1급수, 57.5% 삭감하여 0.02 mg/L, 36.0% 삭감하여 2급수 수질유지가 가능함을 알 수 있었다.

3.5. 평균유량과 실측수질을 고려한 삭감부하 산정

댐 계획당시부터 2003년까지 조사된 유량의 평균을 댐 유입량으로 하고 전주권 생·공용수량을 11.9 CMS로 설정했을 경우에 대한 용담댐 모의운영을 실시하여 대청권 공급량과 여수로방류량을 결정하고, 2002년 8월~2003년 7월에 측정된 수질자료를 보정된 용담댐 저수지 수질모형에 적용하여 신규 연구조건에서의 삭감부하량을 구하였다.

수질변화 모의결과를 전주권 용수공급의 취수탑이 위치한 소구획 28번에 대해 기준 오염물질 COD와 TP의 분기별 최대농도를 기준으로 호소수 수질등급을 판정하여 Table 3에 제시하였다. Fig. 7은 소구획 28에서 삭감률 증가에 따른 COD와 TP 농도의 연간변화이고, Fig. 8은 COD와 TP의 배출부하 삭감률에 따른 각 수질항목의 분기별 최대농도를 도시한 것이다.

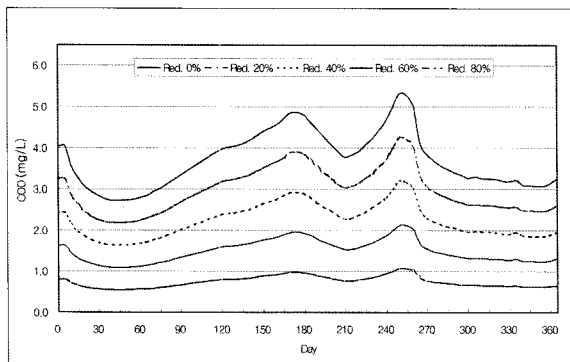


Fig. 7. Water quality improvement by pollution load reduction at intake tower site.

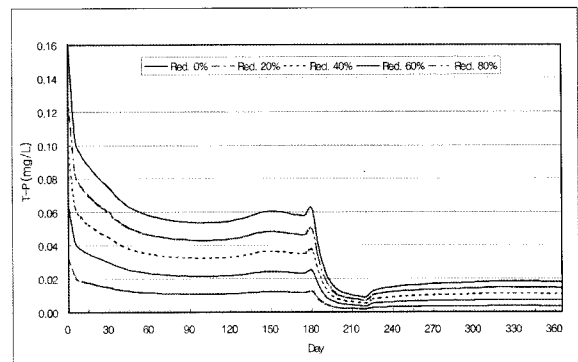
Table 3. Water quality improvement by pollution load reduction in the feature

Quality item	Quarter	Pollution load reduction ratio (%)									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
COD (mg/L)	1/4	III	III	III	III	II	II	II	II	II	I
	2/4	III	III	III	III	III	II	II	II	II	I
	3/4	III	III	III	II	II	II	II	II	I	I
	4/4	III	III	III	III	II	II	II	II	I	I
TP (mg/L)	1/4	IV	IV	III	III	III	III	II	II	II	I
	2/4	II	II	II	II	II	I	I	I	I	I
	3/4	V	V	V	V	IV	IV	IV	III	III	II
	4/4	IV	IV	III	III	III	III	II	II	II	I

(Unit : Water quality grade for potable raw water)

Fig. 8에 나타난 바와 같이 COD를 기준으로 연중 내내 2등급 수질을 유지하기 위해서는 분기별로 최소 26%에서 최대 43%의 오염부하를 삭감하여야 한다. TP의 경우 2등급 수질을 만족시키려면 3/4분기에는 80% 이상을 삭감해야 하는 것으로 계산되었는데 이는 모의기간 초기인 8월의 유입부하 영향이 너무 크게 작용했기 때문이며, Fig. 7에 제시한 전체 기간 농도변화의 경향을 보면 2등급 수질 유지를 위한 적절한 삭감률은 52% 정도로 판단되었다.

용담댐 저수지 평균유량과 실측수질에 근거한 하천유역별 BOD 및 TP의 오염부하량에 수질목표달성에 필요한 삭감률



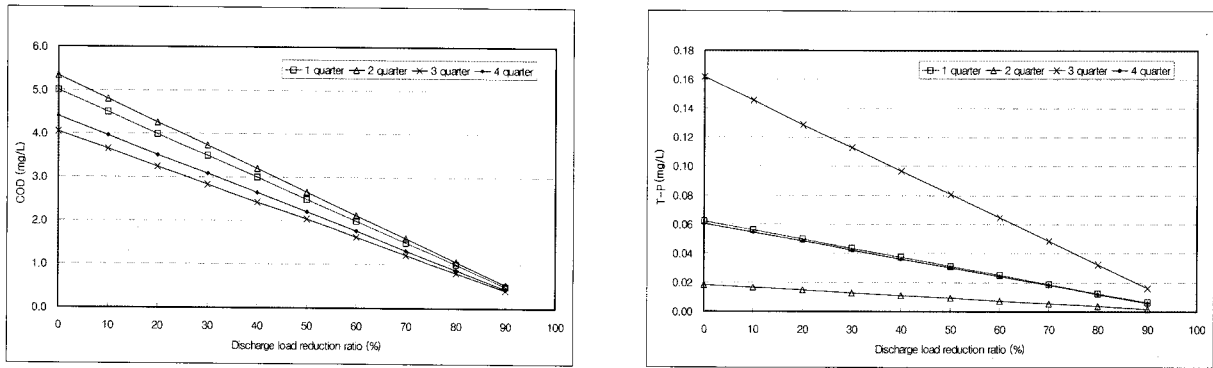


Fig. 8. Quarterly water quality improvement with pollution load reduction ratio.

Table 4. Comparison of environmental capacity and target load reduction

Class	Target water quality* and environmental capacity (kg/day)	Target load reduction (kg/day)
00KOWACO ¹⁾	COD ≤ 1.0 mg/L, BOD 4,744.2 TP ≤ 0.02 mg/L, TP 201.9	BOD 6,507.5(57.8%) TP 118.6(37.0%)
01KOWACO ²⁾	COD ≤ 1.0~2.0 mg/L, BOD 3,538.7 TP ≤ 0.02~0.03 mg/L, TP 263.4	BOD 24,556.6(87.4%) TP 1,875.2(87.7%)
02JIHER ⁴⁾	Estimated load reduction for 26.2% of basin area assigned as the water preservation area in 2007	BOD 1,067.5 (44.9%) TP 21.9 (20.8%)
This research	COD ≤ 3.0 mg/L,	BOD 7,010.3
	≤ 2.0 mg/L,	4,694.3
	≤ 1.0 mg/L,	2,328.5
	TP ≤ 0.03 mg/L,	TP 242.4
	≤ 0.02 mg/L,	166.7
≤ 0.01 mg/L,	80.8	BOD 5,441.4(43.7%) 7,757.4(62.3%) 10,123.2(81.3%) TP 262.6(52.0%) 338.4(67.0%) 424.2(84.0%)

* : Target water quality with pollution load in 2006

을 적용하여 산정된 환경용량과 목표삭감량을 기존연구 결과와 비교하여 Table 4에 제시하였다. 표에서 목표삭감부하량이 목표수질에 따라 변하지만 동일한 목표수질에서 기존연구의 삭감량과 비교하면 BOD는 가장 적고 TP는 4개중 2번째로 적었다.

또한 용담댐 상류 소유역들에 대한 삭감부하량의 배분방법을 검토하기 위하여 Fig. 1의 주요하천별 삭감부하량을 변화시키며 수질목표 대상구획인 취수탑의 수질변화를 분석하였다. 분석결과에서 COD의 경우에는 수질목표 대상구획인 취수탑에 근접한 소유역의 오염부하를 삭감하는 것이 효과적이었고, TP의 경우에는 취수탑과 소유역의 근접 정도가 미치는 영향은 적고 호소 전체에 대한 오염부하 총량의 변화에 따른 영향이 크게 나타났다.

표에 제시된 삭감률은 수질모의 전기간에 걸쳐 목표수질을 보장할 수 있는 값들이다. 향후 용담댐 저수지 수질관리에 수량관리에서 용수공급의 신뢰도와 유사하게 정의되는 전기간의 90~95%와 같은 수질의 확보보장기간을 고려한다면, 목표수질관리에 필요한 삭감률과 수처리 시설용량의 상호 보완이 가능할 것으로 보인다.

4. 결론

전주권을 포함한 서해안 지역의 용수를 공급하고 있는 용

담댐 저수지에 대하여 목표수질을 설정하고 유달부하량과 댐 유입량 및 용수공급 실태를 조사하여 수질의 변화과정을 모의함으로써 환경용량과 오염부하 삭감량을 추정된 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 환경용량 산정의 기준물질은 유기물질에 대해서는 COD를 부영양화를 유발하는 영양염류에 대해서는 TP를 선정하고, 목표수질은 용담댐 저수지내 취수탑 지점에서 호소수질 기준 상수원수 1~2등급, COD 1.0~3.0 mg/L와 TP 0.01~0.03 mg/L로 설정하였다.

2) 용담댐 저수지의 운영실적과 상류하천과 저수지에서 측정된 수질을 근거로 금강분류 저수지구간을 42개 소구획으로 분할하여 용담댐 저수지 수질모형을 WASP5로 구성하고, 보정하여 측정치와 계산치의 상관계수는 BOD 0.73, PO₄-P 0.98이었다.

3) 수질모형을 이용하여 구한 용담댐 저수지의 환경용량은 목표수질 COD 2.0 mg/L와 TP 0.02 mg/L에 대하여 기존 연구조건에서 BOD 131,880 kg/일, TP 7,855 kg/일, 신규 연구조건에서 BOD 4,694 kg/일, TP 167 kg/일이고, 이에 따른 오염부하 삭감률은 기존 연구조건에서 BOD 50.5%, TP 47.2%, 신규 연구조건에서 BOD 62.3%, TP 67.0%로 나타났다. 환경용량은 기존연구보다 작게 추정되었고, 삭감부하율은 기존 결과들의 중간에 해당하였다.

- 4) 상수원수 1~2등급의 목표수질을 연중 달성할 오염부하량률은 기존 연구조건에서 BOD 72.0~15.5%, TP 77.8~36.0%이고, 신규 연구조건에서 BOD 81.3~43.7%, TP 84.0~52.0%로 나타났다. 기존연구의 삭감량과 비교하면 BOD는 가장 적고 TP는 4개중 2번째로 적었다.
- 5) 목표삭감부하량의 소유역별 배분에서 TP는 취수탑 구획에 대한 근접도의 영향이 크게 나타났으나 COD는 별다른 차이가 없었다.

참고문헌

1. 한국수자원공사a, 용담다목적댐 건설사업 수질보전 대책 보고서, pp. 199~302(2000).
2. 한국수자원공사b, 용담다목적댐 건설사업 상수원보호구역지정 보고서, pp. 303~368(2001).
3. 국립환경연구원, 용담다목적댐 수질보전대책 평가 및 수질예측결과(2002.1).
4. 전라북도보건환경연구원, 용담호 수질변화예측에 관한 연구(유입하천 및 용담호 수질예측), pp. 319~409(2002).
5. 천승규, 조희찬, 이광수, “하천구간 및 배수구역 특성을 고려한 금강수계 오염총량관리제 시행방안 연구,” 23(5), 767~779(2001).
6. 한국수자원공사, 용담다목적댐 관리연보, pp. 31~67(2002).
7. 한국수자원공사, 2002년 용담댐일원 하천유량측정 등 수문조사보고서, pp. 283~328(2002).
8. 건설부-한국수자원공사, 용담다목적댐 실시설계 환경영향평가서(1992).
9. 정부합동, “대청호 등 금강수계 물관리종합대책,”(2000).
10. Ambrose, Robert B., Tim A. Wool and James L. Martin. The water quality analysis simulation program, WASP5, Part A: Model documentation, Part B: The input data set. Environmental Research Laboratory, Athens, Georgia 30613(1993).
11. Wool, Tim A., Robert B. Ambrose, James L. Martin and Edward A. Comer. The water quality analysis simulation program, WASP Ver 6.0, User manual, US Environmental Protection Agency-Region 4, Atlanta, Georgia(2002).
12. 건설교통부-한국수자원공사. 기존댐 용수공급 능력조사(금강수계) 보고서(1998).
13. 용담댐관련 공동조사위원회a, 용담댐 용수의 합리적 이용 및 배분, pp. 177~196(2002).
14. 용담댐관련 공동조사위원회b, 용담댐 수질보존대책 연구, pp. 166~224(2003).