

도시유역의 건천화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획:

1. 방법론

Sustainable Water Resources Planning to Prevent Streamflow Depletion
in an Urban Watershed: 1. Methodology

이길성* / 정은성** / 김영오*** / 조탁근****

Lee, Kil Seong / Chung, Eun-Sung / Kim, Young-Oh / Cho, Tak-Gun

Abstract

This study proposed a new procedure of sustainable water resources planning to prevent the urban streamflow depletion, based on the Heathcote's study in 1998: (1) to understand the watershed component and processes, (2) to identify and quantify problems within the watershed, (3) to set clear and specific goals, (4) to develop a list of management options, (5) to eliminate infeasible options, (6) to test the effectiveness of remaining feasible options, and (7) to develop the final options. PSR(Presure-State-Response) concept was used for the determination of indicators of PSD(Potential Streamflow Depletion; step 2) and effect equation (step 7) and composite programming for the calculation of PSD. The instreamflow requirement was proposed as clear and specific goal (step 3) and was determined by the larger of the PHABSIM's environmental flow and the drought flow. A continuous rainfall-runoff model is necessary to test the effectiveness of alternatives. It should estimate not only the exact runoff but also the effect of landuse change, reservoir, infiltration facility and so on like SWAT(Soil and Water Assessment Tool). The proposed procedure will be applied on the corresponding paper.

keywords : Anyangcheon watershed, Composite programming, Integrated watershed management, Sustainable water resources planning

요 지

본 연구에서는 도시하천의 건천화 방지를 위한 지속가능한 수자원계획을 수립하기 위한 절차를 Heathcote가 제안한 다음과 같은 7단계를 토대로 제시하였다. 단계별 절차는 (1) 유역의 물순환 관련 요소 파악, (2) 문제점 도출 및 우선순위의 결정, (3) 분명하고 구체적인 목표의 설정, (4) 모든 대안의 제시, (5) 가능한 대안의 선별, (6) 선별된 대

* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수

Professor, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea
(e-mail: kilselee@snu.ac.kr)

** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사수료

PhD Candidate, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea
(e-mail: cool77@snu.ac.kr)

*** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수

Assistant Professor, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea
(e-mail: yokim05@snu.ac.kr)

**** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 석사졸업

Master student, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea
(e-mail: snutak1@snu.ac.kr)

안의 효과분석, (7) 최종대안의 수립으로 이루어져 있다. 대상 유역의 정량적인 평가를 위한 건전화 지수 산정(2단계)과 대안의 효과 평가(7단계)에 지속가능한 개발 개념인 PSR 모형을 사용하여 각각의 인자를 결정할 것을 제안하였으며, 정량적인 평가에는 복합계획법의 사용을 제안하였다. 구체적인 목표 설정(3단계)을 위해 국내에서 이수관리를 위해 고시하고 있는 하천유지유량을 PHABSIM과 갈수량 산정방식을 이용하여 결정하도록 하였으며, 대안들의 효과 분석(6단계)에는 정확한 연속유출모의뿐만 아니라 토지이용 변화, 저수지 건설 및 운영 등의 대안을 모의할 수 있는 SWAT과 같은 정밀한 수문모형을 제안하였다. 제안된 절차는 다음 논문을 통해서 안양천 중상류 유역에 적용될 것이다.

핵심용어 : 안양천 유역, 복합계획법, 유역통합관리, 지속가능한 수자원 계획

1. 서 론

국내·외의 도시 유역은 급격한 도시화에 따른 불투수 지역과 지하수 이용 증가로 인한 기저유출(baseflow)의 감소, 상류 저수지의 농업용수를 위한 방류량 감소, 합류식 하수관거로 인한 우수회귀 손실 등으로 일부 하천에는 갈수기 하천유량이 현저히 감소하고 있다. 심명필(2003)은 전국의 지방2급 이상 하천을 대상으로 건천여부를 조사한 결과 3,773개 중 543개, 약 14.4%가 건기에 하천이 메말라 있음을 보였으며 이기영(2005)은 경기도내 2급하천 71개를 선별하여 조사한 결과 건전화된 하천의 수가 조사대상의 74.6%인 53개에 이름을 제시하였다. 만약 건기의 무 강우시 하천에 필요한 유량이 유지되지 않는다면 하천 및 인근 유역에서 생태, 환경적인 측면에서 심각한 문제가 발생할 수 있다. 그 예로서 도시하천인 안양천의 경우 최근 20~30년간 도시화가 급격히 이루어지고 인구가 급속히 증가함으로 인해 유역의 물순환이 심각하게 왜곡되었다. 특히 지천의 건천화가 심각하여 이를 해결하기 위해 다양한 측면에서 연구가 진행되었다(이삼희, 2001; 이기영, 2003; 이기영과 김지영, 2003; 이길성, 2004; 이길성 등, 2005, 2006a; 이승중 등, 2005; 이정민 등, 2006a, 2006b).

최근 치수에 대한 관심이 높아지면서 심명필(2004)은 유역의 통합적인 치수관리를 위해 치수사업에 대한 경제성평가와 투자우선순위 결정을 위한 현실적인 분석방법 등을 포함한 종합지침서를 제시하였다. 하지만 아직까지 도시하천의 건전화 방지를 위한 유역통합관리(Integrated Watershed Management, IWM)에 대한 구체적인 이론 및 적용방법에 대해서 연구된 바는 거의 없다. 본 연구의 선행연구인 이길성 등(2006a)에서는 도시하천의 유역통합관리를 위한 접근법을 제시한 바가 있다. 따라서 본 연구에서는 전형적인 도시하천 유역을 대상으로 유역통합관리 이론을 적용하여 건전화 방지를

위한 지속가능한 수자원 계획(Sustainable Water Resources Planning, SWRP)을 수립하기 위한 구체적인 절차 및 이론을 제시하였다.

2. 유역통합관리

유역통합관리의 이론을 실제로 적용하기 위해 Heathcote(1998)가 제안한 일반적인 유역관리 계획을 위한 단계별 절차를 도입하였다. 단계별 절차는 (1) 유역의 물순환 관련 요소 파악, (2) 문제점 도출 및 우선순위의 결정, (3) 분명하고 구체적인 목표의 설정, (4) 모든 대안의 제시, (5) 가능한 대안의 선별, (6) 선별된 대안의 효과분석, (7) 최종대안의 수립으로 이루어져 있다. 1-5단계는 단순한 접근법을 바탕으로 예비타당성 계획을 수립하는데 사용되며, 6-7단계는 복잡한 수문모형과 최적화 방법 등이 사용되어 타당성 계획을 수립하는데 사용될 수 있다. 하지만 타당성 계획을 수립하기 위해서는 1-5단계를 좀 더 상세하게 수행해야 한다. 특히 1단계의 경우 정확한 수문모형을 구축하여 물 및 오염물질 순환을 분석하는 등 정확한 현황을 파악할 필요가 있다. 본 연구에서 제안하는 건전화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획 수립 절차는 Fig. 1과 같으며 각각의 단계를 국내 실정에 맞게 변형하여 제안하였다. 특히 1단계의 유역현황 파악을 위한 SWAT 및 PLOAD의 적용, 2단계의 유역의 상태평가 지수 산정, 3단계의 하천유지유량 산정, 4단계의 최근의 다양한 대안, 5단계의 대안의 선택, 6단계의 SWAT을 이용한 대안의 효과 평가, 7단계의 효과 지수 산정을 구체적으로 제시하였다. 각각의 단계별 내용은 다음과 같다.

2.1 유역의 물순환 관련 요소 파악

유역의 물순환을 파악하기 위한 기초적인 구성요소를 파악하기 위해서는 다음과 같은 10 가지의 항목에 대해 자료 수집 및 분석(문헌조사)이 시도되어야 한다.

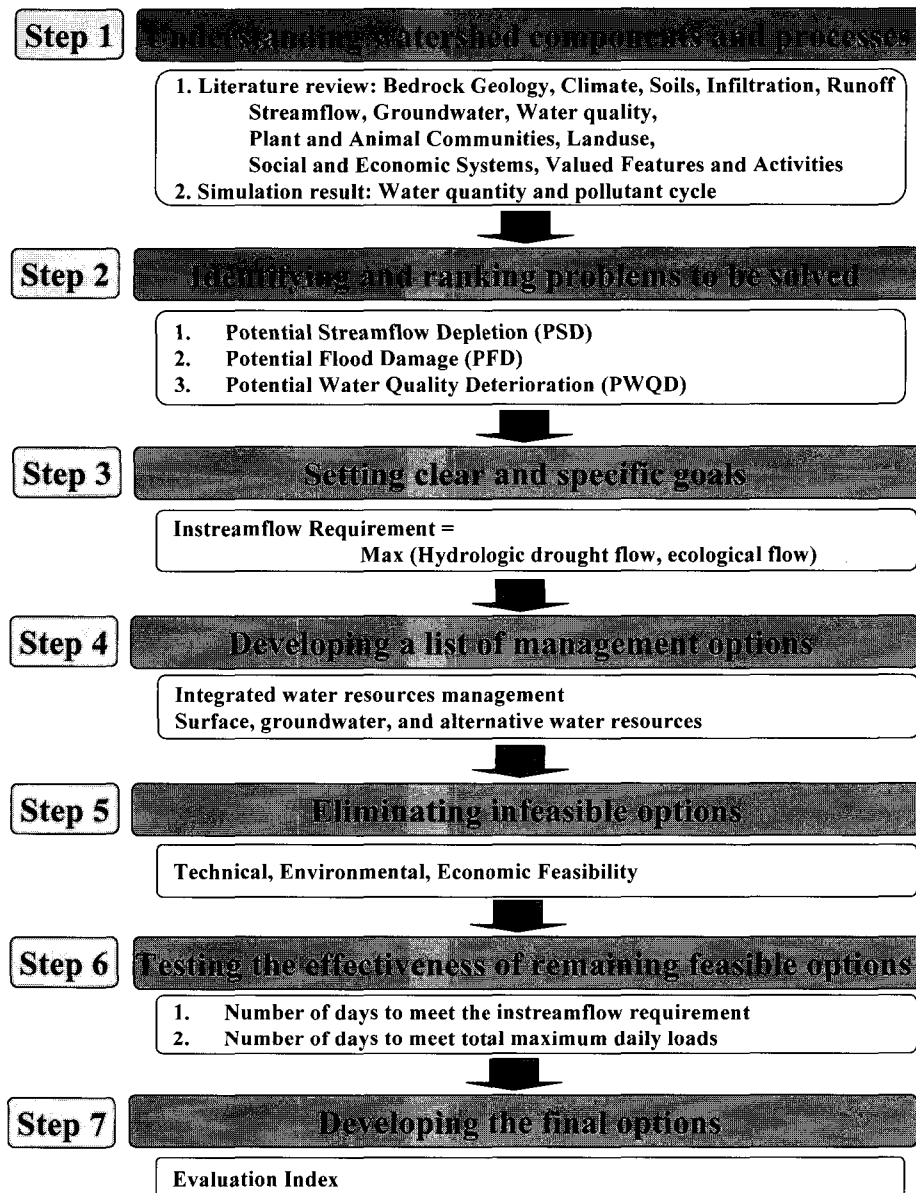


Fig. 1. Sustainable Water Resource Planning Procedure to Prevent Streamflow Depletion

- 물리적인 특징과 지표면 형태
- 기상: 온도, 증발량, 강수량, 풍속, 습도 등
- 토양, 침투량, 유출량
- 하천수: 수위, 수량
- 지하수: 지하수 수위, 지하수 취수량
- 하천 수질: 온도, pH, DO, BOD, COD, SS, NO₂-N, NO₃-N, NH₃-N, Dis-P, 등
- 토지이용: 과거, 현재, 미래
- 동식물의 분포상태: 종과 개체의 수
- 사회, 경제적 지표: 인구, 홍수피해액 등
- 특이 사항과 활동: 하천 및 유역관련 공사, 시민단체 활동 등

이상의 10가지 항목은 기존에 알려진 수치자료, 보고서, 통계자료 등을 통해 조사될 수 있는 사항이다. 하지만 이러한 자료를 모두 조사할 필요는 없으며 대상유역의 특성과 계획 및 관리 목적별로 차등을 두어야 한다. 오히려 이러한 10가지 항목만으로는 도시유역의 경우 정확한 물순환 과정을 파악하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 수문모형을 이용한 물순환의 파악, 강우시 유출수의 농도를 직접 측정하여 산정한 유량가중 평균농도(Event Mean Concentration, EMC)의 파악 등을 제안한다. 앞의 10가지 자료는 유역에 대한 일반적인 정보를 제공하는데 반해 추가된 두 가지는 유역의 물순환 중 수량과 오염물질에 대해 정량적으로 파악할 수 있게 해주어 구체적인 문제점까지 정량화할 수 있게 한다.

2.2 문제점 도출 및 우선순위의 결정

치수의 경우 유역종합치수계획을 수립하기 전에 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD)을 산정하여 대상유역의 지역별 위험도를 산정하고 있다. 하지만 건천화 방지를 위한 하천관리를 위해서 제도적으로 정해진 지역별 위험도를 산정하는 방법이 없으므로 본 연구에서는 이길성 등(2006a)에서 제안한 건천잠재능(Potential Streamflow Depletion, PSD)을 사용하기로 하였다. PFD에서 사용한 지속가능한 개발(sustainable development) 지표인 압력-상태-반응(Pressure-State-Response, PSR; OECD, 1993) 모델을 이용하여 건천잠재능을 산정하기 위한 인자를 결정하였다. 또 지수 산정방식은 다기준 의사결정 이론 중 하나인 복합계획법(composite programming; Bardossy and Bogardi, 1983)을 사용하였다.

하지만 대상유역이 건천화가 가장 문제가 되는지 알아보기 위하여 PFD와 수질오염잠재능(Potential Water Quality Deterioration, PWQD)을 산정할 필요가 있다. 또한 전반적인 유역의 오염상황을 알아보기 위하여 유역평가지수까지 산정이 요구된다. 이러한 유역의 상태를 정량적으로 산정하기 위한 절차는 Fig. 2와 같다.

(1) 홍수피해잠재능

홍수피해잠재능을 산정하기 위한 수식은 Eq. (1)이고 관련 요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 PFD = & \left(\beta_{1,1} s_{PD}^{b_1} + \beta_{1,2} s_{PV}^{b_1} + \beta_{1,3} s_{NI}^{b_1} + \beta_{1,4} s_{NNC}^{b_1} \right) \\
 & + \left(\beta_{1,5} s_{RI}^{b_1} + \beta_{1,6} s_{UR}^{b_1} + \beta_{1,7} s_{SW}^{b_1} + \beta_{1,8} s_{FD}^{b_1} \right) \\
 & + \left(\beta_{1,9} s_{NI}^{b_1} + \beta_{1,10} s_{NR}^{b_1} + \beta_{1,11} s_{PS}^{b_1} \right)^{1/b_1} \quad (1)
 \end{aligned}$$

단, β 는 가중치이며 ($\beta_{1,1} + \beta_{1,2} + \beta_{1,3} + \beta_{1,4} = \beta_{1,5} + \beta_{1,6} + \beta_{1,7} + \beta_{1,8} = \beta_{1,9} + \beta_{1,10} + \beta_{1,11} = 1$), b_1 은 PFD에 대한 균형값(balancing factor)이다.

- 피해대상: 인구밀도 (S_{PD}), 사회기반시설 (S_{PV}), 사회기반시설 (S_{NI}), 자연·문화자원 (S_{NNC})
- 피해가능성: 강우강도 (S_{RI}), 도시지역비율(S_{UR}), 유역경사 (S_{SW})
- 방어능력: 내수방어능력 (S_{SL}), 저수지 (S_{NR}), 외수 방어능력 (S_{NP})

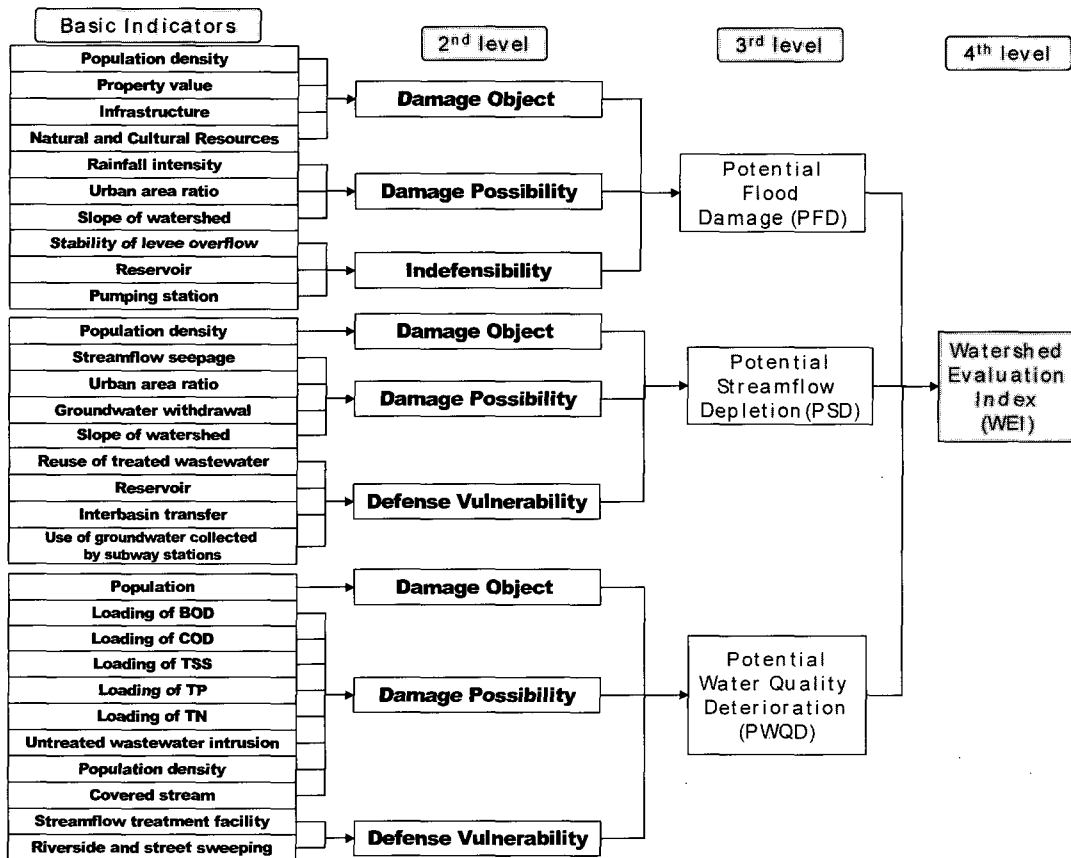


Fig. 2. The Indicator Structure of Indices (이길성 등, 2006a)

(2) 건천잠재능

건천잠재능을 산정하기 위한 수식은 Eq. (2)이고 관련 요소는 다음과 같다.

$$PSD = \{(\beta_{2,1}s_{PD}^{b_2} + \beta_{2,2}s_{SS}^{b_2} + \beta_{2,3}s_{UR}^{b_2} + \beta_{2,4}s_{GW}^{b_2} + \beta_{2,5}s_{SW}^{b_2}) + (\beta_{2,6}s_{RT}^{b_2} + \beta_{2,7}s_{NR}^{b_2} + \beta_{2,7}s_{IT}^{b_2} + \beta_{2,9}s_{UR}^{b_2})\}^{1/b_2} \quad (2)$$

단, β 는 가중치이며 ($\beta_{2,1} = \beta_{2,2} + \beta_{2,3} + \beta_{2,4} + \beta_{2,5} = \beta_{2,6} + \beta_{2,7} + \beta_{2,8} + \beta_{2,9} = 1$), b_2 은 PSD에 대한 균형값이다.

- 피해대상: 인구밀도 (S_{PD})
- 피해가능성: 하천수 바닥손실 (S_{SS}), 도시지역비율 (S_{UR}), 유역경사 (S_{SW}), 지하수 취수량 (S_{GW})
- 방어능력: 하수처리수 재이용 (S_{RT}), 저수지 (S_{NR}), 도수 (S_{TR}), 지하철 용출수 이용 (S_{UG})

(3) 수질오염잠재능

수질오염잠재능을 산정하기 위한 수식은 Eq. (3)이고 관련 요소는 다음과 같다.

$$PWQD = \{(\beta_{3,1}s_P^{b_3}) + (\beta_{3,2}s_{LB}^{b_3} + \beta_{3,3}s_{LC}^{b_3} + \beta_{3,4}s_{LS}^{b_3} + \beta_{3,5}s_{LP}^{b_3} + \beta_{3,6}s_{LN}^{b_3} + \beta_{3,7}s_{WI}^{b_3} + \beta_{3,8}s_{PD}^{b_3} + \beta_{3,9}s_{CS}^{b_3}) + (\beta_{3,10}s_{ST}^{b_3} + \beta_{3,11}s_{RS}^{b_3})\}^{1/b_3} \quad (3)$$

단, β 는 가중치이며 ($\beta_{3,1} = \beta_{3,2} + \beta_{3,3} + \beta_{3,4} + \beta_{3,5} + \beta_{3,6} + \beta_{3,7} + \beta_{3,8} + \beta_{3,9} = \beta_{3,10} + \beta_{3,11} = 1$), b_3 은 PWQD에 대한 균형값이다.

- 피해대상: 인구 (S_P)
- 피해가능성: BOD 부하량 (S_{LB}), COD 부하량 (S_{LC}), SS 부하량 (S_{LS}), TN 부하량 (S_{LN}), TP 부하량 (S_{LP}), 하수처리수 재이용 (S_{WI}), 인구밀도 (S_{PD}), 복개하천 (S_{CS})
- 방어능력: 하천수질 정화시설 (S_{ST}), 하천변 및 유역 청소 (S_{RS})

2.3 목적 및 목표수립

본 연구의 목적은 건천화 방지로 설정되었으므로 하

천관리를 위해 이수기에 설정하는 하천유지유량 (instreamflow requirement)을 구체적인 목표로 하였다. 하천유지유량은 하천에 흘러야 할 최소유량으로 정의된다. 하천유지유량은 갈수량을 기준으로, 하천 수질 보전, 하천 생태계 보호, 하천 경관 보전, 염수 침입 방지, 하구막힘 방지, 하천시설물 및 취수원 보호, 지하수위 유지를 위한 필요유량을 비교하여 큰 값으로 선정한다. 여기서 갈수량은 과거 자연상태의 하천에서 갈수기에 흘렀던 유량으로서 자연과 사람이 공유할 수 있는 최소한의 유량을 말하며 기준갈수량, 평균갈수량을 산정한 후 하천의 규모나 특성 및 유량공급 가능성을 고려하여 결정한다(한국수자원학회, 2005).

2.4 대안의 구성

4단계에서는 하천의 건천화 방지를 위한 창의적이고 다양한 대안들을 제시하여야 한다. 구체적인 실행가능성(feasibility)과 상관없이 검토할 만한 가치가 있는 대안들을 모두 수집하여야 한다. 건천화 방지를 포함한 물순환 건천화를 위한 다양한 대안들은 이길성 등(2006a)에 제시되어 있다.

2.5 대안의 선별

앞에서 제시된 대안들을 기술적(technical), 경제적(economic), 환경적(environmental) 가능성(feasibility) 측면에서 정성적으로 검토(Walesh, 1989)하여 실행가능한 대안을 선정한다. 이 과정에서는 일반적으로 특정 대안이 대상 유역에 적용할 수 있는지 여부만 판단하는 과정으로 현장답사 및 문헌조사를 통해 결정한다. 이 과정에서 시민단체, 지자체 공무원 등의 의견이 중요하다.

2.6 효과분석

대안에 대한 효과분석을 수행하기 위해서는 반드시 적절한 수문모형을 적용하여야 한다. 특히 대상유역에 대해 비교적 정확하게 연속유출모의를 수행할 수 있어야 하며 토지이용변화, 저수지, 침투관련 시설 등에 대해 모두 모의할 수 있어야 한다. 다양한 유역관리 수단의 효과를 분석할 수 있는 수문모형일수록 더 좋다.

2.7 대안 결정

대안의 효과분석 결과를 이용하여 지속가능한 개발 지표인 PSR 모형을 토대로 복합계획법을 사용하여 효과지수 산정식을 다음 Eq. (4)와 같이 제시하였다.

$$f(a_i) = 1 - [\alpha PO_i + \beta PSD_i + \gamma\{0.5d(a_i) + 0.5l(a_i)\}] \quad (4)$$

여기서 PO_i 는 대안 i 가 적용되는 지역의 인구밀도의 무차원 값이고, PSD_i 는 대안 i 가 적용되는 지역의 건전잠재능이며, $d_i(a_i)$ 는 대안 i 의 갈수량에 대한 효율(= 대안 i 로 인한 갈수량 증가량 / 목표유지유량)이고, $l_i(a_i)$ 는 대안 i 의 저수량에 대한 효율(= 대안 i 로 인한 저수량 증가량 / 목표유지유량)이다. 즉, 인구는 압력, 건전잠재능은 상태, 효과는 반응에 해당되며 $\alpha, \beta, \gamma(\alpha+\beta+\gamma=1)$ 는 각각에 해당되는 가중치이다.

3. 연구방법

3.1 지속가능성 평가 지수

지속가능한 개발 개념은 자원을 효율적으로 사용하고 사회적으로 공평하게 분배하며, 후세대가 사용이 가능하도록 생태적 능력을 유지할 수 있는 범위내에서 개발하는 것으로 정의된다. 수자원분야에서 지속가능성은 경제적 효율성, 사회적 공평성, 환경적 보전성을 기본으로 다양하게 정의되고 있다. 이들 정의의 공통점은 지속가능한 수자원 이용은 현 세대뿐만 아니라 다음 세대들도 사용이 가능하도록 수자원을 재생이 가능하게 이용하며 생태계를 고려하면서 사용자가 원하는 수준의 수량과 수질을 달성하도록 수자원을 관리하고 수자원과 관련된 사회적 시스템을 유지 발전시키는 것이라 할 수 있다(Hashimoto et al., 1982; ASCE, 1998; Cai and Lasdon, 2002).

수자원의 지속가능성을 평가하기 위해 개발된 지수는 많지 않을 뿐만 아니라 적용도 쉽지 않다. 이는 수자원 뿐만 아니라 사회, 경제, 환경 등의 다양한 분야까지 포함해야 하기 때문이다. 국내의 수자원 이용 및 관리 상태나 지속가능성을 평가하기 위하여 개발된 지수로는 WPI(Water Poverty Index) SWSI(Social Water Stress/Scarcity Index), ESI(Environmental Sustainability Index), WRSI(Water Resources Sustainability Index) 등이 있다(Sullivan, 2001, 2002; OECD, 1998; EEA, 1999, 강민구와 이광만, 2006). 수자원의 지속가능성을 평가하는 지수는 수자원과 관련된 정보들을 단순화시키고 계량화하여 내포된 의미를 비전문가들도 이해하기 쉬어야 한다. 그러나 이들 지수를 구성하는 지표들 중에는 관련 자료를 우리나라에서 획득할 수 없는 것들도 있어 적용에 제한이 따른다(강민구와 이광만, 2006).

본 연구에서는 OECD가 개발한 가능성을 평가할 수 있는 개념모형인 PSR 모형을 이용하였다. PSR 모형의 기본 개념은 Fig. 3과 같은데 인간의 활동들이 환경에 압력을 주며 자연자원의 질과 양에 영향을 미치며(상태), 이러한 것에 대한 인식과 행동을 통해 사회가 정책과 제도 등을 통해 반응한다는 것에 초점을 두었다. PSR 모형은 이러한 서로의 인과관계에 주목하므로 의사결정자들에게 도움이 될 뿐만 아니라 대중들이 환경과 자연 관련 요소들과 직접적이지 않아도 어느 정도 서로 연결되어 있음을 알 수 있다.

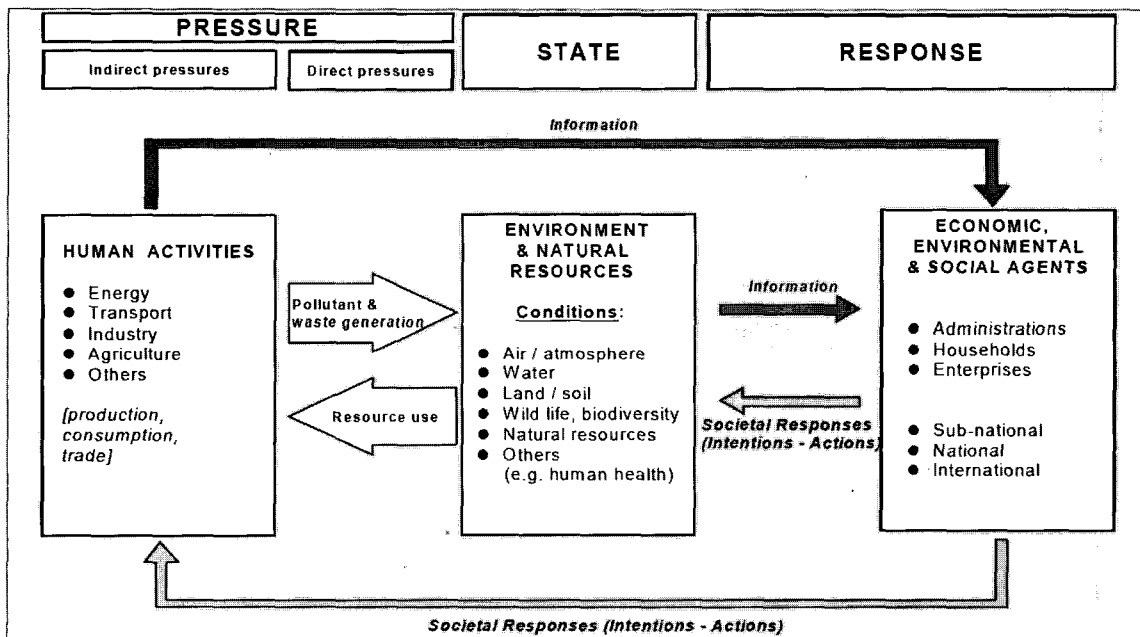


Fig. 3. Concept of Pressure-State-Response Model (OECD, 1998)

PSR 모형은 사용목적에 따라 매우 다양하게 변화되어 적용되어 왔다. UNCS(2001)의 DFSR(Driving Force-State-Response), EEA(1999)의 DPSIR(Driving force-Pressure-State-Impact-Response)과 같은 예가 있다.

3.2 복합계획법

복합계획법은 다단계 다기준 의사결정법으로 지형탐사문제에서 관측의 정확성과 자료취득을 위한 노력사이의 절충점을 고려할 수 있는 관측 네트워크를 구성하기 위해 개발하였다(Bardossy and Boggadi, 1983). 일반적인 다목적 계획법은 단일 목적으로 변환되는데 반해 복합계획법은 한 개의 목적으로 그룹화하여 단계별로 진행시키는 방법이다.

복합계획법은 분석대상이 되는 시스템의 상태를 나타내기 위해 기본 지표를 선택하는 일에서 시작된다. 여기서 기본지표는 2단계 지표로 통합되며 2단계 지표 역시 3단계 지표로 통합되는 다단계 다기준 의사결정(multi-level, multi-criteria decision making) 과정이다. 이때 각 기본지표는 단위가 서로 다른 문제를 해결하기 위해 무차원화 시킨다. 본 연구에서 사용된 무차원화 방법은 이상점접근법(ideal point approach)으로 각 인자의 무차원화를 위해 Eq. (5)를 사용하였다.

$$s = \frac{\sigma_{ideal} - \sigma}{\sigma_{ideal} - \sigma_{worst}} \quad (5)$$

여기서 s 는 무차원화된 값이고, σ 는 실제 값이고, σ_{ideal} 은 이상점(ideal point)에서의 값이고 σ_{worst} 는 가장 좋지 않은 경우(worst point)의 값이다.

이렇게 무차원화 시킨 각각의 기본지표는 다음과 같은 식을 이용하여 2단계 지표로 통합되며 3단계 역시 같은 과정으로 계산된다. 산정된 값은 이상점까지의 거리(composite distance)를 의미한다. 이상점은 목표가 되는 유역을 선정하여 실측 자료를 토대로 산정해야 하지만 현재까지 이에 대한 연구가 충분하게 이루어져 있지 않기 때문에 본 연구에서는 유역 내에서 가장 좋은 값을 사용하였다.

$$L_j = \left(\sum_{i=1}^{N_i} w_{ij} s_{ij}^{b_j} \right)^{1/b_j} \quad (6)$$

여기서 L_j 는 j 그룹의 이상점까지의 거리값이고, $s_{i,j}$ 는 j 그룹에서 i 인자(indicator)의 무차원화 된 값이고, $w_{i,j}$ 는 j 그룹내의 i 인자에 대한 가중치이고(각 그룹 내의

모든 인자들의 가중치의 합은 1), N_j 는 j 그룹의 총 인자의 수, b_j 은 j 그룹의 균형값(balancing factor)이다. 복합계획법은 이중가중 과정을 가지는데 하나는 각각의 인자에 대한 상대적인 의사결정자의 각 인자에 대한 중요도를 반영하고 다른 하나는 각각의 그룹에 대한 중요도 즉 각각 그룹 내 인자의 편차에 대한 중요도를 의미한다. 높은 균형값은 각 인자의 값의 편차가 더 커짐을 의미한다.

또한 대상지역 및 적용자에 따라 달라질 뿐만 아니라 값에 따라 건친 정도의 순위가 바뀔 수 있는 중요한 문제이다. Lee et al.(1991)은 계층화분석과정(Analytic Hierarchy Process, AHP) 방법을 이용하여 가중치를 산정하였으나, 본 연구에서는 10명의 현장전문가의 의견을 평균하여 사용하였다. 또한 균형값은 최대편차(maximal deviation)의 중요성을 반영하는 요소로 인자의 가능한 최대치와 개별 값의 최대 차이를 의미한다. 따라서 균형값이 클수록 최대편차에 대한 관심이 더 크다는 것을 의미한다. Hartmann et al.(1987)은 L_j 가 0.3 이하인 것은 “건전한(sound) 상태”, 0.3-0.6일 경우를 “수용가능한(acceptable) 상태”, 0.6 이상인 경우를 “좋지 않은(poor) 상태”라고 제안하였다. 이러한 복합계획법을 사용하여 산정한 값을 이용하여 대안이나 대상의 상태에 대한 순위 및 등급을 산정할 수 있다.

Hartmann et al.(1987)은 수자원 개발문제에서 통합 환경평가를 위해 이러한 복합계획법을 이용하여 종합적으로 의사결정을 하는 방법을 개발하였다. 이 방법을 Istvan and Andras(2003)가 GUI(Graphic User Interface)를 보완하여 JESEW(Joint Ecological and Socio-economic Evaluation of Water resources development)를 구축하였다. Lee et al.(1991)은 준설된 오염물질의 처리를 위한 장소 선택 문제를 해결하기 위해 불확실성을 감안하여 다목적 의사결정을 할 수 있는 Fuzzy Composite Programming(FCP)을 개발하였다. Hagemeyer et al.(1995)은 쓰레기 매립장 선택 문제에 FCP를 사용하여 위험순위(hazard ranking)를 산정하였다. Yurdusev and O'Connel(2005a, b)은 수자원 계획을 수립할 때 복합계획법을 사용하여 환경에 대한 영향을 고려하는 방법론을 개발하고 이를 적용한 결과를 제시하였다. 본 연구에서는 이러한 복합계획법을 사용하여 대상유역의 중유역들의 취약성을 정량화하고 순위 및 등급을 산정하였다.

3.3 하천유지유량

하천유지유량은 하천에 흘러야 할 최소유량으로 정

의된다. 하천유지유량은 갈수량을 기준으로 선정하되, 하천 수질 보전, 하천 생태계 보호, 하천 경관 보전, 염수 침입 방지, 하구막힘 방지, 하천시설물 및 취수원 보호, 지하수위 유지를 위한 필요유량을 감안하여 산정한 다. 여기서 갈수량은 과거 자연상태의 하천에서 갈수기에 흘렀던 유량으로서 자연과 사람이 공유할 수 있는 최소한의 유량을 말하며 기준갈수량, 평균갈수량을 산정한 후 하천의 규모나 특성 및 유량공급 가능성을 고려하여 결정한다(한국수자원학회, 2005). 기본적으로 하천유지유량은 현재상태와 비교하여 앞으로 하천의 수리·수문과 환경 조건 등이 크게 변하지 않는 이상 변경될 수 없는 유량이지만 하천에 따라 새롭게 자연적 기능을 강화하거나 수요에 의해 인위적 기능이 증감될 경우에는 이에 맞추어 변경될 수 있다(오규창 등, 1991; 김규호 등, 1996).

3.3.1 산정방법

본 연구에서는 현재 하천유지유량 산정을 위해 가장 널리 사용되고 있는 김규호 등(1996)이 제시한 다음과 같은 절차를 토대로 목표유량을 결정하였다.

- (1) 하천환경 및 하천특성의 파악
 - 하천유황, 하천의 각종 유출입량, 하도상황, 자연환경과 사회환경 등
- (2) 하천의 하도구분 및 대표지점의 설정
 - 하도구분: 하천 이용과 기능 검토 시 해당 하천의 하천환경 특성을 바탕으로 복수 구간으로 설정하고 각 구간별로 갖는 특성을 검토
 - 대표지점: 기준지점과 보조기준지점으로 나뉘며, 기준지점은 해당 하천의 이수 또는 저수관리를 적절하게 실시하기 위한 기준이 되는 지점을 설정함. 보조기준지점은 기준지점에서 하천관리유량을 검토할 경우에 기준지점을 보완하기 위한 지점이며 필요에 따라 복수로 설정할 수 있음
- (3) 갈수량 및 항목별 필요유량의 검토 및 설정
 - 필요유량: 하천수질, 생태계(어류), 하천경관, 수상이용, 기타(염수침입방지, 하구막힘 방지, 하천관리시설 보호, 지하수위의 유지)
- (4) 구간별 하천유지유량의 설정
 - 각 항목별로 대표지점 또는 하도구간에서 선정된 조사지점의 필요유량과 갈수량을 비교하여

큰 값을 하천유지유량으로 결정

3.3.2 갈수량 산정

한국수자원학회(2005)에서는 하천유지유량을 산정시 기준갈수량과 평균갈수량을 산정한 후 해당 하천의 규모나 특성 및 유량공급 가능성을 고려하여 결정한다고 하였으며 본류는 평균갈수량을 산정하였고, 상류의 댐 등과 같이 하류에 유량을 공급할 수 있는 시설이 없는 지류에는 기준갈수량을 산정하였다. 계측유역의 갈수량은 과거의 유량자료로부터 임의 지속기간의 유황곡선을 작성한 후, 매년 초과확률 또는 최저치 유량을 나열하고 그로부터 산술평균 또는 빈도분석을 통해 산정하게 된다. 그러나 과거 유량자료가 없거나 부분적으로 존재하는 미계측유역은 유역내 또는 인근지역의 계측유역 자료나 수문모형 결과를 이용하여 갈수량을 추정해야 한다.

3.3.3 PHABSIM

PHABSIM(Physical HABitat SIMulation system; USGS, 2001)은 하천유량 관리 문제를 처리하는 개념적이고 분석적인 구조인 Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)의 일부분이다(Stalnaker et al., 1995). 어류가 수리학적 환경변동에 따라 직접 반응한다는 가정을 바탕으로 개별 유기체가 가장 좋아하는 유지조건을 선택하는 경향이 있어서 유지조건이 점점 나빠지면 서식처 선호도도 감소하여 서식어류가 적어진다고 하는 전제를 배경을 하고 있다(Stalnaker et al., 1976; Milhous et al., 1989). PHABSIM은 임의의 유량에 대한 수리모의를 수행하고, 모의결과를 서식처 적합곡선과 결합하는 서식처 모의를 통해 가중가용면적과 유량과의 관계를 얻어내는 모형이다. 유량을 점차 증가시키면서 가중가용면적과 유량의 관계곡선을 얻어낸 후 최대의 가중가용면적에서의 유량을 생태계 보존을 위한 필요유량으로 채택한다.

최근 국내에서는 자연 및 생태에 대한 관심이 고조되면서 PHABSIM을 이용한 물고기의 서식처 확보를 위한 유지유량 산정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 상세한 모형에 대한 설명과 이론은 USGS(2001), 김규호 등(2000), 강정훈 등(2004), 성영두 등(2005)에 수록되어 있다.

3.4 SWAT

강우-유출 모형에서는 합리식과 같은 간단한 모형으로부터 여러 개의 매개변수를 처리해야 하는 복잡한 모형에 이르기까지 다양한 형태의 모형들이 개발되었으며 HEC-1, SSARR(Streamflow Syntheses And Reservoir

Regulation; US Army Corps of Engineers, 1972), SWMM(Storm Water Management Model, Metcalf and Eddy, Inc. et al. 1971), HSPF(Hydrologic Simulation Model, FORTRAN, Bicknell et al, 2001), SWAT 등이 있다. HEC-1은 1년 이상의 연속유출 모의가 불가능하며, SSARR는 집중형 모형으로 GIS 모형과의 연동이 불가능하고, SWMM은 분산형 모형으로 하수관거를 포함하여 모의가 가능하지만 GIS 모형과 연동이 불가능하여 유역의 특성을 상세하게 반영하기 어려우며, HSPF는 GIS 모형과 연동이 가능하지만 건기 모의시 가장 중요한 토양의 상태를 상세하게 반영하지 못한다. 하지만 분산형, 물리적 기반모형인 SWAT은 GIS로 구축된 토양, 토지이용, 수치지형도를 입력자료로 사용하여 자세하고 정확한 모의가 가능하므로 본 연구에서는 SWAT 모형을 선정하였다.

SWAT 모형은 미국 농무성의 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 유역 모형으로 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발된 모형이다 (Arnold et al., 2002; Arnold and Fohrer, 2005).

SWAT 모형에는 크게 기상, 수문, 영양 물질, 침식, 식생, 관리, 하도 추적, 수체의 8가지 부 모형으로 이루어져 있다. 입력자료는 GIS(Geographic Information System)를 통해 자동으로 구성되는 유역 전체의 물리적인 유역자료와 토양자료, 작물자료가 있고 수동 입력을 통해 작성되는 기상, 하도추적, 농업관리, 지하수 등의 자료, GIS와 수동 입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구분된다. 또한 출력자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 수문반응단위(HRU, Hydrologic Response Unit)별 출력자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과치로 구분된다. 여기서 HRU란 수문반응단위로 SWAT 모형 계산의 기본단위이다. 전체적인 토양도와 토지이용도를 구축한 후 DEM(Digital Elevation Model) 구축 시 분할한 격자(cell) 크기에 맞추어 토양도와 토지이용도를 분할한다. 격자 안에는 각각 지형자료와 토지이용자료 및 토양자료가 입력되는데 이러한 각각의 격자를 HRU라고 한다.

다양한 연구(이길성 등, 2006b; 신문주, 2006; 신현석과 강두기, 2006; 정은성 등, 2006)에서 다양한 국내유역에 대한 SWAT 모형의 적용성을 인정받았으므로 이를 사용하였다.

4. 결 론

급격히 도시화된 유역의 경우 홍수피해는 더 커지고, 건기에는 하천수가 부족하여 메말라가며 하천의 수질은 오염되어 있어 접근하기 어려운 정도에 있는 등 대부분 물순환이 심각하게 왜곡되어 있다. 대상유역의 경우 이러한 문제를 해결하기 위한 유역관리의 목적을 건천화 방지로 결정하고 이를 위해 유역통합관리 원리에 입각하여 지속가능한 수자원계획 절차를 개발하였다. 대상 유역의 정량적인 평가를 위한 건천화 지수 산정(2단계)과 대안의 효과 평가(7단계)에 지속가능한 개발 개념인 PSR 모형을 사용하여 각각의 인자를 결정할 것을 제안하였으며 정량적인 평가에는 복합계획법의 사용을 제안하였다. 구체적인 목표 설정(3단계)을 위해 국내에서 이수관리를 위해 제정하고 있는 하천유지유량을 PHABSIM과 갈수량 산정방식을 이용하여 산정하도록 하였으며, 대안들의 효과분석(6단계)에는 정확한 연속유출모의뿐만 아니라 토지이용 변화, 저수지 건설 및 운영, 침투증진 시설 등의 대안을 모의할 수 있는 SWAT과 같은 수문 모형을 제안하였다. 제안된 절차는 안양천 중상류 유역에 적용되었다(이길성 등, 2006). 이러한 연구는 향후 치수, 이수, 수질관리 문제를 모두 고려하는 유역 통합관리를 위한 수자원 계획을 수립하는데 응용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-2)의 서울대학교 공학연구소를 통한 연구비 지원과 Safe and Sustainable Infrastructure Research의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- 강민구, 이광만 (2006). "수자원의 지속가능성 평가 지수 개발과 구성 요소의 중요도 평가." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제1호, pp. 59-68.
- 강정훈, 이은태, 이주현, 이도훈 (2004). "어류의 서식처 조건을 고려한 하천의 필요유량 산정에 관한 연구." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제11호, pp. 915-927.

- 김규호, 이진원, 홍일표, 우효섭 (1996). “하천유지유량 결정 방법의 개발 및 적용: 1. 산정방법.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제29권, 제4호, pp. 161-176.
- 김규호, 조원철, 전병호 (2000). “수량·수질 모의치를 이용한 어류 서식조건 유지에 필요한 적정유량 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 3-14.
- 성영두, 박봉진, 주기재, 정관수 (2005). “하천의 어류 서식환경을 고려한 생태학적 추천유량 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제7호, pp. 545-554.
- 신문주 (2006). **SWAT 모형을 이용한 안양천 유역의 유량확보와 수질개선에 대한 방안**. 서울대학교 석사학위논문.
- 신현석, 강두기 (2006). “SWAT모형을 이용한 인공저류시설물의 하류장기유출 영향분석 기법에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제3호, pp. 227-240.
- 심명필 (2003). **지속가능한 하천수 개발**. 인하대학교, 과학기술부.
- 심명필 (2004). **치수사업 경제성분석 방법 연구**. 한국수자원학회, 건설교통부.
- 오규창, 정상만, 박상진, 유영석 (1991). “한강에서의 하천유지유량 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제24권, 제1호, pp. 119-128.
- 이기영 (2003). **안양천 살리기 종합대책**. 경기개발연구원, 경기도.
- 이기영 (2005). **효율적인 하천 유지관리 방안**. 경기개발연구원.
- 이기영, 김지영 (2003). **경기도내 하천의 건천화 방지에 관한 연구**. 경기개발연구원.
- 이길성 (2004). **안양천 유역의 물순환 건천화 기술적용**. 서울대학교, 과학기술부.
- 이길성, 정은성, 김영오 (2006a). “도시 유역 관리를 위한 통합적인 접근방법.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제2호, pp. 161-178.
- 이길성, 정은성, 신문주 (2006b). “기후, 지하수 취수 및 토지이용의 변화의 건기 총유출량에 대한 영향.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제11호, pp. 923-934.
- 이길성, 정은성, 신문주, 김영오 (2006c). “도시유역의 건천화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획: 2. 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제11호, pp. 947-960.
- 이길성, 진락선, 이상호, 이정민 (2005). “PCSWMM을 이용한 건천화 방지를 위한 유지용수의 공급 방안 II 모형의 적용” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제6B호, pp. 437-441.
- 이삼희 (2001). **안양천 살리기 종합계획**. 한국건설기술연구원, 안양시.
- 이승중, 김영오, 이상호, 이길성 (2005). “WEP 모형을 이용한 도립천 유역 물순환 모의.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제6호, pp. 449-460.
- 이정민, 이상호, 이길성 (2006a). “물 환경 건천화를 위한 도시하천의 물 순환 모의(I) 안양천 유역.” **한국물환경학회논문집**, 한국물환경학회, 제22권, 제2호, pp. 349-357.
- 이정민, 이상호, 이길성 (2006b). “투수성 포장을 고려한 SWMM의 수정 및 하수처리 재이용수와 투수성 포장의 효과분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제2호, pp. 109-119.
- 정은성, 이길성, 신문주(2006). “SWAT 모형과 EMC 산정결과를 이용한 안양천의 수량 및 수질 특성.” **한국물환경학회논문집**, 한국물환경학회, 제22권, 제4호, pp. 648-657.
- 한국수자원학회 (2005). **하천시설 설계기준**.
- Arnold, J.G., and Fohrer, N. (2005). “SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling.” *Hydrological Processes*, Vol. 19, No. 3, pp. 563-572.
- Arnold, J.G., Neitsch, S.L., Kiniry, J.R., Williams, J.R., and King, K.W. (2002). *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation Ver. 2000*. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, TWRI Report TR-191.
- ASCE Task Committee on Sustainability Criteria (1998). *Sustainability Criteria for Water Resource System*. Am. Soc. of Civ. Eng., Reston, Va.
- Bardossy, A., and Bogardi, I. (1983). “Network design for the spatial estimation of environmental variables.” *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 12, pp. 339-369.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L. Jr., Jobs, T.H., and Donigan, A.S. Jr. (2001). *Hydrologic*

- Simulation Program - Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12*. U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA.
- Cai, X. M. and Lasdon, L. S. (2002). "A framework for sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin." *Water Resource Research*, Vol 39, No. 8, pp. 1085-1098.
- European Environment Agency (1999). *Environmental Indicators: Typology and Overview*, Copenhagen, Denmark.
- Hagermeister, M.E., Jones, D.D., and Woldt, W.E. (1995). "Hazard ranking of landfills using fuzzy composite programming." *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 4, pp. 248-258.
- Hartmann L., Torno C., Bogardi, I., and Higler L. (1987). *Methodological Guidelines for the Integrated Environmental Evaluation of Water Resources Development*. Unep/Unesco Project FP/5201-85-01, Paris.
- Hashimoto, T., Loucks, D.P., and Stedinger J.R. (1982). "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- Heathcote, I.W. (1998). *Integrated Watershed Management*. John Wiley & Sons, New York.
- Istvan B., and Andras B. (2003). *Quick User Guide: JESEW*. Delft University of Technology.
- Lee, Y.W., Bogardi, I., and Stansbury, J. (1991). "Fuzzy decision making in dredged-material management." *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 5, pp. 614-630.
- Metcalf and Eddy, Inc., University of Florida, and Water Resources Engineers, Inc. (1971). *Storm Water Management Model*. Vol. 1, Water Pollution Control Research Series 11024 DOC 07/71, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C.
- Milhous, R.T., Updike, M.A., and Schneider, M. (1989). *Physical Habitat Simulation System Reference Manual-Version 2*. Instream Flow Information Paper 26, USDI Fish and Wildlife Services, Biology Report 89 (16).
- OECD (1993). "OECD core set of indicators for environmental performance reviews." OECD Environment Monographs, No. 83, OECD, Paris.
- OECD (1998). *Towards Sustainable Development: Environmental Indicators*.
- Stalnaker, C.B., and Arnette, S.C. (1976). *Methodologies for Determination of Stream Resource Flow Requirements: An Assessment*. US Fish and Wildlife Services, Office of Biological Services Western Water Association.
- Stalnaker, C.B., Lamb, B.L., Henrikson, J., Bovee, K.D., Bartholow, J.M. (1995). *The Instream Flow Incremental Methodology, A Primer for IFIM*. Biological Report 29, National Biological Service, Fort Collins, Colorado.
- Sullivan, C. A. (2001). "The potential for calculating a meaningful water poverty index." *Water International*, Vol. 26, No. 4, pp. 471-480.
- Sullivan, C. A. (2002). "Calculating a water poverty index." *Water Development*, Vol. 30, No. 7, pp. 1195-1210.
- UN Commission on Sustainable Development (2001). *Indicators of Sustainable Development Framework and Methodologies*. United Nations, New York.
- U. S. Army Corps of Engineers (1972). *Program Description and User Manual for SSARR Model - Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model*, Corps of Engineers, North Pacific Division, Department of the Army, Portland, Oregon.
- U. S. Geological Survey (2001). *PHABSIM for Windows, User Manual and Exercises*. Midcontinent Ecological Science Center, Fort Collins, Colorado.
- Walesh, S.G. (1989). *Urban Surface Water Management*. John Wiley & Sons, New York.
- Yurdusev, M.A. and O'Connell, P.E. (2005a). "Environmentally-sensitive water resources planning: 1. Methodology." *Water Resources*

Management, Vol. 19, pp. 375-397.

Yurdusev, M.A. and O'Connel, P.E. (2005b).

"Environmentally-sensitive water resources planning: 2. A case study." *Water Resources*

Management, Vol. 19, pp. 399-421.

(논문번호:06-69/접수:2006.07.06/심사완료:2006.10.24)