

# 안양천 유역의 물순환 건전화를 위한 지속가능한 수자원 관리계획

Sustainable Water Resources Planning for Rehabilitation of Hydrologic Cycle  
in the Anyangcheon Watershed:

정은성\*, 공기서\*\*, 이길성\*\*\*, 유진채\*\*\*\*

Eun-Sung Chung, Ki-Seo Kong, Kil Seong Lee, Jin-Chae Yoo

## 요    지

본 연구에서는 안양천 유역에 대해 왜곡된 물순환을 건전화시키기 위한 유역통합관리 계획을 수립하였다. 대안의 효과분석은 HSPF 모형을 사용하였으며 평가지수는 건전화 방지와 수질개선 효과 요소로 구성되며 각각은 유역통합관리 6단계 결과를 모두 사용할 수 있도록 복합계획법과 지속가능성 개념(압력-상태-반응)을 활용하여 개발되었다. 특히 수량과 수질에 대한 가중치는 유역주민의 의견을 반영하기 위해 실험선택법으로 정량화하여 유역의 속성별로 달리 적용하였다. 대안은 평가지수에 따라 세 등급(Good, Acceptable, Poor)으로 나누어 제시하였다

**핵심용어:** 안양천, 지속가능성, 복합계획법, 실험선택법, 평가지수

## 1. 서 론

유역통합관리의 이론을 실제로 적용할 수 있는 계획을 세우기 위해서는 다음과 같은 7단계를 수행하는 절이 바람직하다: Step 1) 대상유역에 대한 정보수집, Step 2) 문제점 도출 및 우선순위의 결정, Step 3) 분명하고 구체적인 목표의 설정, Step 4) 모든 대안의 제시, Step 5) 가능한 대안의 선별, Step 6) 선별된 대안의 효과분석, Step 7) 최종대안의 수립. 본 연구는 왜곡된 물순환을 건전화시키기 위한 유역통합관리를 수립하는 연구의 세 번째 부분으로 이길성 등(2006a, 2006b, 2006c)의 연구를 다음과 같은 측면에서 개선하였다.

- 수질 측면에서 현황을 파악하기 위해 HSPF(Hydrological Simulation Program - FORTRAN; Bicknell et al., 2001) 모형을 이용하였음(Step 1)
- 대안의 평가를 위해 이수뿐만 아니라 측면까지 확대하였으며 효과에 대한 가중치는 시민의 의견을 반영하여 하천별로 다르게 산정하였음 (Step 7)

본 연구에서는 Step 1(이길성 등 2007b), Step 2(이길성 등, 2006a), Step 3(이길성 등, 2006c), Step 4 (이길성 등, 2006a), Step 6 (이길성 등 2007a)에서 수행하였으므로 Step 1-6의 결과를 모두 사용하여 Step 7의 결과를 제시하였다.

\* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사수료 E-mail: [cool77@snu.ac.kr](mailto:cool77@snu.ac.kr)

\*\* 충북대학교 농업과학기술연구소 특별연구원 E-mail: [kskong@chungbuk.ac.kr](mailto:kskong@chungbuk.ac.kr)

\*\*\* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수 E-mail: [kilselee@snu.ac.kr](mailto:kilselee@snu.ac.kr)

\*\*\*\* 충북대학교 농업환경생명대학 농업경제학과 교수 E-mail: [jcyoo@chungbuk.ac.kr](mailto:jcyoo@chungbuk.ac.kr)

## 2. 평가 지수 산정 방법

본 연구는 유역통합관리 방안의 Step 2에서 평가한 유역별 이수, 수질관리 측면에서 위험도, 즉 건천잠재능(Potential Streamflow Depletion, PSD), 수질오염잠재능(Potential Water Quality Deterioration, PWQD)을 감안하여 대안의 상대적 가치를 고려할 뿐만 각각의 효과에 대해 적절한 가중치를 두어 정량적으로 제시하는 대안에 대한 평가지수(Evaluation Index, EI) 산정방안을 다음과 같이 제안하였다.

$$f(a_i) = (w_1 f_1^p + w_2 f_2^p)^{1/p} \quad (1)$$

여기서  $a_i$ 는  $i$  대안이며,  $f_1$ 은 이수 측면에서 효과 ( $0 \sim 1$ ),  $f_2$ 는 수질개선 측면에서 효과 ( $0 \sim 1$ )를 나타내는 값이며  $w_1, w_2$ 는 각각 이수, 수질관리 항목의 중요도에 대한 가중치이고  $p$ 는 균형값(balancing factor)이다.

본 연구에서는 지속가능성 개념을 반영하여  $f_1, f_2$ 을 계산하는 식을 다음과 같이 압력(pressure)-상태(state)-반응(Response)을 고려하여 제안하였다.

$$f_j(a_i) = (k_1 PR_{j,i}^p + k_2 ST_{j,i}^p + k_3 RE_{j,i}^p)^{1/p} \quad (2)$$

여기서,  $i$ 는 대안명이고,  $j$ 는 1인 경우는 이수, 2인 경우는 수질관리를 의미하며,  $k_1, k_2, k_3$ 은 압력, 상태 반응에 대한 가중치이고,  $PR_{j,i}$ 은 대안  $i$ 가  $j$ 측면에서의 압력에 대한 지수,  $ST_{j,i}$ 는 상태에 대한 지수,  $RE_{j,i}$ 는 반응에 대한 지수를 의미한다.

$PR_{j,i}, ST_{j,i}, RE_{j,i}$ 는  $j$ 의 값에 따라 구성하는 인자가 달라질 수 있는데 본 연구에서는 압력의 경우는 인구밀도, 상태의 경우는 PSD, PWQD와 같은 평가인자, 반응의 경우는 대안으로 인한 개선효과로 산정하였다. 개선효과 지수는 관리자에 따라 다양하게 설정할 수 있는데 본 연구에서는 다음과 같이 제안하였다.

$$\begin{aligned} RE_{1,i} &= w_1 y_{1,i} + w_2 y_{2,i} \\ RE_{2,i} &= w_3 y_{3,i} + w_4 y_{4,i} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $y_{i,1}$ :  $i$  대안의 목표갈수량 대비 확보 갈수량,

$y_{i,2}$ :  $i$  대안의 목표저수량 대비 확보 저수량,

$y_{i,3}$ :  $i$  대안의 지천에 대한 목표 BOD 총량 대비 저감량,

$y_{i,4}$ :  $i$  대안의 안양천 전체에 대한 목표 BOD 총량 대비 저감량,

$w$ : 각각의 항목에 대한 가중치( $w_1 + w_2 = w_3 + w_4 = 1$ )이다.

또  $w$ 는 가중치이며 관리자가 관리목적에 맞게 변화시킬 수 있으며 제안된 식들을 치수와 관련하여 확장시킬 수 있다. 이러한 평가항목들은 의사결정자나 평가방법마다 달라질 수 있으므로 향후 종합적인 검토가 요구된다.

Eqs (2)와 (3)을 통합하여 본 연구에서 사용한 수량확보와 수질개선에 대한 효과지수 산정식은 각각 Eqs 4, 5와 같다.

$$f_1(a_i) = [k_1 PO_n^p + k_2 PSD_n^p + k_3 \{0.5d(a_i) + 0.5l(a_i)\}^p]^{1/p} \quad (4)$$

여기서,  $PO_n, PSD_n$ 는 대안  $i$ 가 적용되는  $n$ 유역의 압력에 해당되는 값인 인구밀도이고 건천잠재능이고,  $d(a_i)$ 는 유황곡선(flow duration curve)에서 목표 유지유량에 대한 대안  $i$ 로 인한 갈수량(drought flow,  $Q_{355}$ )

의 변화율이며,  $l(a_i)$ 는 목표 유지유량에 대한 저수량(low flow,  $Q_{275}$ )의 변화율이다.

$$f_2(a_i) = [k_1 PO_n^p + k_2 PWQD_n^p + k_3 \{0.5q(a_i) + 0.5t(a_i)\}^p]^{1/p} \quad (5)$$

여기서,  $PWQD_n$ 은 대안  $i$ 가 적용되는  $n$  유역의 수질오염잠재능이고,  $q(a_i)$ 는 목표 수질에 대한 대안  $i$ 로 인한 수질의 변화율이며,  $t(a_i)$ 는 일 총부하량(total daily loads)의 변화율이다. Eqs 4와 5는 유역통합관리를 위한 Step 1 ~ 6의 결과를 모두 사용하였는데 Step 1은 압력(PO)의 정량화, Step 2는 상태(PSD, PWQD)의 정량화, Step 3과 6은 반응( $d, l, q, t$ )의 정량화, Step 4와 5는 대안,  $a_i$ 의 선택에 사용된다.

### 3. 적용결과

#### (1) 가중치 산정

본 연구에서는 수량확보와 수질개선에 대한 효과에 대한 가중치를 유역주민들의 의견을 바탕으로 실험선택법(choice experiment method; McFadden, 1986)을 사용하여 산정한 가구당 지불의사액(willingness to pay, WTP) 결과(공기서 등, 2006)를 활용하여 Table 1과 같이 산정하였다.

Table 1. Estimates of Weighting Values

Type	Status-quo		Implicit Prices (won/month -household)	Sum of Implicit Prices	Weight
I	Instreamflow	Insufficient flow	729.0	1,675.8	0.44
	Water quality	3 <sup>rd</sup> grade	946.8		0.56
II	Instreamflow	Insufficient flow	729.0	1,775.1	0.41
	Water quality	2 <sup>nd</sup> grade	1,046.1		0.59
III	Instreamflow	Sufficient flow	1,529.4	2,476.2	0.62
	Water quality	3 <sup>rd</sup> grade	946.8		0.38
IV	Instreamflow	Sufficient flow	1,529.4	2,575.5	0.59
	Water quality	2 <sup>nd</sup> grade	1,046.1		0.41

#### (2) 평가지수 산정

수량 및 수질 측면에서 Eqs 1, 4, 5를 사용하여 평가지수를 산정한 결과와 각각의 등급 및 순위를 나타내면 Table 2와 같다. Hartmann et al.(1987)에서 제안한 대로 복합계획법의 연산결과인 EI를 바탕으로 0.6이상을 “Good” G등급, 0.3 ~ 0.6을 “Acceptable” A등급, 0.3이하를 “Poor” P등급이라고 하면 수량 측면에서 각각의 등급에 해당되는 대안은 다음과 같다.

- G: S5, I4, U2, S5&U4, W1 (5개)
- A: R2, R4, S1, S2, S4, I2, I3, I5, U3 (9개)
- P: R1, R3, S3, I1, U1 (5개)

수질 측면에서의 EI를 바탕으로 대안을 세 그룹으로 나누면 다음과 같다.

- G: S1, S2, S4, S5, U3, U4 (6개)
- A: R2, R4, S3, U2, W1 (5개)
- P: R1, R3, I1, I2, I3, I4, I5, U1 (8개)

이상의 수량과 수질측면의 효과분석 결과와 수량 확보와 수질개선에 대한 동일 가중치를 사용하여 종합적인 대안의 평가지수를 산정한 결과는 Table 2와 같다. 또 EI를 바탕으로 대안들을 세 그룹으로 나누면 다음과 같다.

- G: S4, S5, U2, U3, U4, W1 (6개)
- A: R2, R4, S1, S2, S3, I4, I5 (7개)
- P: R1, R3, I1, I2, I3, U1 (6개)

Table 2. Calculation Results of Evaluation Index, Rank, and Grade

Name of Alternative	Quantity	Quality	Evaluation	Rank	Grade
R1	0.173	0.093	0.266	16	P
R2	0.272	0.123	0.394	11	A
R3	0.090	0.131	0.221	18	P
R4	0.153	0.249	0.402	10	A
R class	0.17	0.15	0.32	IV	A
S1	0.230	0.304	0.534	7	A
S2	0.205	0.286	0.491	8	A
S3	0.183	0.158	0.341	13	A
S4	0.329	0.337	0.667	3	G
S5	0.386	0.374	0.759	1	G
S class	0.27	0.29	0.56	II	A
I1	0.102	0.118	0.219	19	P
I2	0.210	0.069	0.279	15	P
I3	0.267	0.025	0.292	14	P
S3&I4	0.375	0.057	0.432	9	A
I5	0.305	0.086	0.391	12	A
I class	0.25	0.07	0.32	IV	A
U1	0.094	0.148	0.241	17	P
U2	0.366	0.245	0.612	6	G
S5&U3	0.337	0.288	0.625	5	G
S4&U4	0.414	0.322	0.737	2	G
U class	0.30	0.25	0.55	III	A
W1	0.387	0.238	0.626	4	G
W class	0.387	0.238	0.626	I	G

각 대안별 효과지수를 지속가능성의 구성성분인 압력, 상태, 반응 별로 나타내면 Fig. 1과 같다. 대부분 현재의 상태가 좋지 않은 유역을 대상으로 대안(S4, S5, U3, U4, W1)을 계획하였으므로 상태에 대한 값이 가장 많이 차지하며 효과가 좋은 대안(I8)도 높은 순위를 보였다. 특히 학의천을(I1) 제외한 하수처리수 재이용 대안들은 수량 측면에서는 G, A 등급을 보였으나 수질 측면에서는 재이용수의 농도가 하천수질보다 높고 일종오염부하량도 증가시키므로 모두 P등급을 보여서 결국 P등급 2개, A등급 2개로 평가받았다. 하천 복개 철거 대안들은 수량에서는 비교적 좋지 않은 평가(G등급 1개, A등급 1개, P등급 3개)를 받았으나 수질 측면에서는 좋은 평가를 받아 결국 G등급 2개, A등급 3개로 평가받았다. 지하철 역사에서 발생한 지하수를 하천 유지용수로 활용하는 대안들은 대방천, 봉천천, 도림천 유역과 같이 도시화 비율이 60~70%에 이르므로 압력과 상태가 좋지 않았을 뿐만 아니라 효과도 좋아서 G등급 3개 P등급 1개로 비교적 좋은 평가를 받았다. 이 외에 도림천 상류에 하수처리장을 건설하는 대안은 수량 측면에서 매우 우수한 효과를 보일뿐만 아니라 수질측면에서도 A등급을 보여서 결국 G등급으로 평가받았고 저수지 운영 관련 대안은 수량 측면에서만 약간의 효과가 있으므로 비교적 좋지 않은 결과를 보였다. 하지만 비용이 비교적 적게 소요되므로 경제성을 고려하면 높은 순위를 기록할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 안양천 유역에 대해 왜곡된 물순환을 전환화시키기 위한 유역통합관리 계획을 수립하였다. 유역의 물순환 파악(Step 1)은 정교한 수문모형을 이용하여 수량과 수질에 대해 정량적으로 제시한 연구 결과를 활용하였으며(이길성 등, 2007a), 문제점 파악(Step 2)은 안양천 전체 20개 중유역에 대해 이길성 등(2006b)이 제안한 절차를 바탕으로 잠재적인 위험도를 이수, 치수, 수질관리 측면에서 제시하였다. 안양천 유역의 경우 잠재적인 전환화에 대한 위험도가 가장 높게 나타났으며 이를 관리 목표(Step 3)로 수립하였다.

하지만 건기의 수량화보와 수질은 높은 상관관계가 있고 최근 하천의 수질에 대한 요구 기준이 높아지면서 수질항목도 함께 고려하였다. 따라서 목표 유지유량과 목표수질을 모두 수립하였는데 목표유지유량은 이길성 등(2006b)에서 제안한 방법에 경관 필요 유량을 추가로 고려하여 산정하였으며 목표수질은 지방자치단체에서 설정한 값을 고려하여 설정하였다. 이렇게 제안된 목표 유지유량에 대해 현재의 유출량을 비교하여 최근 10년간 평균 부족일수를 월별로 제시하고 PSD와 비교하였다. 대안은 이길성 등(2006a)에서 제안한 대안 중 HSPF 모형으로 효과분석이 가능한 대안을 설정하였으며 이중 현재 유역내 설치된 대안도 다른 대안과 비교를 위해 포함시켰다. 대안의 효과분석은 HSPF 모형을 사용하였으며 평가지수는 유역통합관리 1~6단계를 모두 사용하였으며 건천화 방지와 수질개선 효과 요소를 고려하여 지속가능성 개념(압력-상태-반응)을 활용하여 산정하였다. 이때 수량과 수질에 대한 가중치는 유역주민의 의견을 실험선택법으로 정량화하여 유역의 속성별로 달리 적용하였으며 대안들은 평가지수에 따라 세 등급(Good, Acceptable, Poor)으로 나누어서 제시하였다.

본 연구는 향후 치수 관련 내용과 대안을 실행하기 위한 비용까지 포함하여 종합적인 유역통합관리 기본계획의 수립 시 대안의 우선순위를 결정하는 데 이론, 절차 및 적용 사례로 활용될 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-3)의 서울대학교 공학연구소를 통한 연구비 지원과 Safe and Sustainable Infrastructure Research의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

1. 공기서, 정은성, 유진채, 이길성 (2006). “물순환 건전화 대안 적용을 위한 안양천의 속성별 가치추정.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제39권, 제12호, pp. 1031-1042.
2. 이길성, 이준석, 정은성 (2007a). “안양천 유역의 물순환 건전화를 위한 수자원 관리계획: 2. HSPF 모형을 이용한 대안기술의 효과 분석.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회 (제출).
3. 이길성, 정은성, 김영오 (2006a). “도시 유역 관리를 위한 통합적인 접근방법.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제39권, 제3호, pp. 151-168.
4. 이길성, 정은성, 김영오, 조탁근 (2006b). “도시유역의 건천화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획: 1. 방법론.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제39권, 제11호, pp. 935-946.
5. 이길성, 정은성, 신문주, 김영오 (2006c). “도시유역의 건천화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획: 2. 적용.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제39권, 제11호, pp. 947-960.
6. 이길성, 정은성, 이준석 (2007b). “안양천 유역의 물순환 건전화를 위한 수자원 관리계획: 1. HSPF 모형을 이용한 물순환 및 BOD 부하량 현황 분석.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회 (제출).
7. Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L. Jr., Jobes, T.H., and Donigian, A.S. Jr. (2001). *Hydrologic Simulation Program - Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12*. U.S. Environmental Protection.
8. Hartmann L., Torno H.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.
9. McFadden, D. (1974). *Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior*. in P. Zarembka, ed, *Frontiers in Econometrics*, New York, Academic Press.

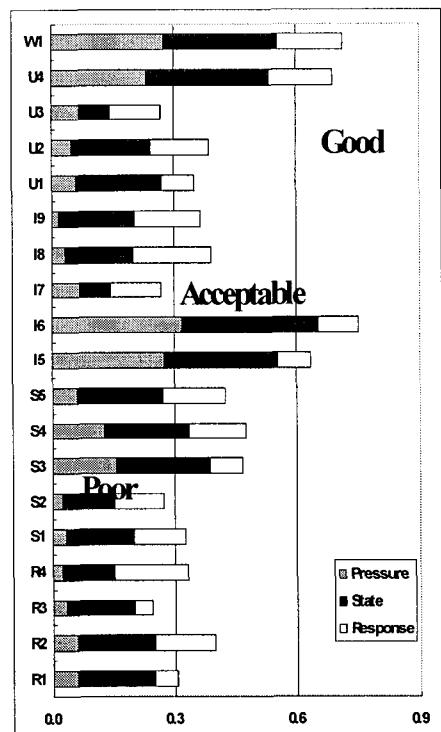


Fig. 1. Constitution of Evaluation Index