

# 도시유역의 건천화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획: 2. 적용

## Sustainable Water Resources Planning to Prevent Streamflow Depletion in an Urban Watershed: 2. Application

이길성\* / 정은성\*\* / 신문주\*\*\* / 김영오\*\*\*\*

Lee, Kil Seong / Cung, Eun-Sung / Shin, Mun-Joo / Kim, Young-Oh

### Abstract

This study shows the application of sustainable water resource planning procedure developed in the previous paper. Its goal is to prevent the streamflow depletion in upstream watershed of the Anyangcheon which is a typical urban stream. The pressure-state-response model which is the framework to reflect the sustainability was applied. The composite programming which is the multilevel multicriteria decision making technique is also used in the calculation of state and evaluation index. The feasible alternatives were proposed and hydrologically analyzed by SWAT(Soil and Water Assessment Tool) and the priority ranking of alternatives were proposed based on the results of SWAT.

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

### 요 지

선행연구에서 제안된 건천화 방지를 위한 유역통합관리 절차를 안양천 중상류 유역에 적용한 결과이다. 특히 대상 유역에 대한 물순환 흐름을 파악하기 위한 구체적인 자료 및 취득방법을 제시하였고, 중유역별 상태파악 및 대안 선택에 PSR 모형을 사용하여 지속가능성에 대한 개념이 반영하였으며, 지수산정 방식은 다단계 다기준 의사결정알고리즘 중 하나인 복합계획법을 사용하는 등 구체적인 방법을 제시하였다. 또한 대상유역에 대해 구체적인 건천화 방지 대안을 제시하였으며 SWAT 모형을 이용하여 각각에 대해 물순환 개선 효과분석을 수행하였고 이 결과를 바탕으로 대안의 평가지수를 산정하여 우선순위를 제시하였다.

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

\* 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)

\*\*\* 동부엔지니어링 사원

Dong-bu Co., Seoul, Korea

(e-mail: bluebear96@hanmail.net)

\*\*\*\* 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)

## 1. 서론

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.

최근 치수에 대한 관심이 높아지면서 유역종합치수 계획을 비롯한 유역의 통합적인 치수관리를 위해 치수 사업에 대한 경제성평가와 투자우선순위 결정을 위한 현실적인 분석방법 등을 포함한 종합지침서를 제시하였다. 하지만 아직까지 이수를 위한 유역통합관리(Integrated Watershed Management, IWM)를 위한 구체적인 이론 및 적용방법에 대해서 연구된 바는 거의 없다. 본 연구의 선행연구인 이길성 등(2006a)에서는 도시하천의 유역통합관리를 위한 접근법을 제시한 바가 있으며 앞선 연구(이길성 등, 2006b)에서는 이를 토대로 건천화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획을 수립하기 위한 절차와 사용될 이론을 소개하였다. 따라서 본 연구에서는 기아대교를 출구점으로 하는 안양천 중상류 유역을 대상으로 유역통합관리 이론을 적용하여 지속가능한 수자원 계획(Sustainable Water Resources Planning, SWRP)을 수립하였다.

안양천 유역은 최근 25년간 급속한 도시화를 이루면서 빈번한 홍수피해와 극심한 하천수 부족, 물고기 다량 폐사 등의 수질문제 등 도시의 물순환이 심각하게 왜곡되어 있다(이길성 등, 2006a). 하지만 최근 청계천 복원을 기점으로 하천환경에 대한 관심이 극대화 되면서 유역 주민은 물론 지자체까지 하천환경 개선에 대한 수요가 증대되고 있다. 이를 반영하여 2001년에는 안양천 수질개선 대책협의회까지 결성하였으며 실무회의 및 자문위원회까지 구성하여 왕성한 활동을 하고 있다. 또한 안양천 환경개선을 위한 다양한 연구(이삼희, 2001; 심명필, 2003; 이기영, 2003; 이길성, 2004; 이기영, 2006)와 계획(남원 Eng., 2002; 현대 Eng., 2005; 삼안과 동호, 2005) 등이 수립되는 등 하천 및 유역의 환경개선을 위한 관심과 노력이 증대되고 있다.

## 2. 대상유역

대상유역은 안양천(Anyangcheon, AY)의 중상류 유역으로 Fig. 1과 같이 기아대교를 출구점으로 하며 서울의 남서쪽에 위치하고 좌표는 동경 126° 52' ~127° 03', 북위 37° 19' ~37° 27' 이다. 대상유역은 왕곡,

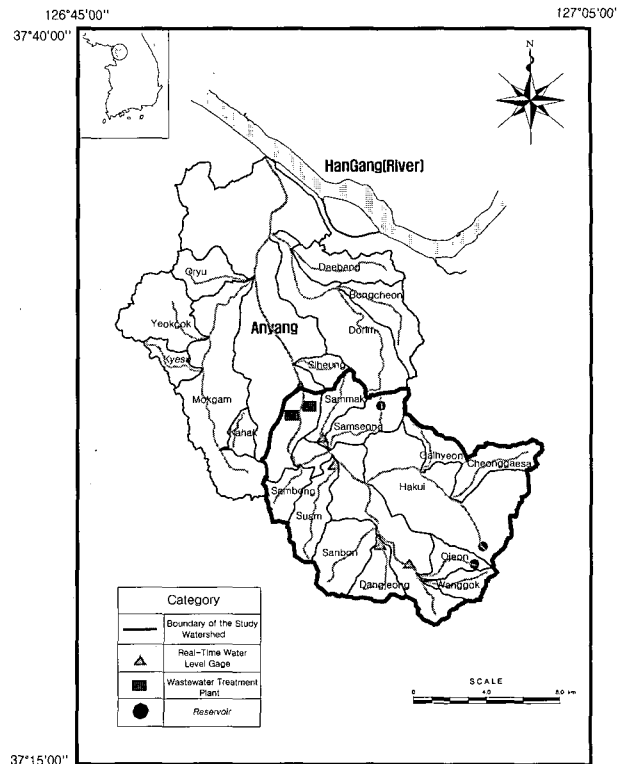


Fig. 1. Description of the Study Watershed

오전, 산본, 당정, 학의, 청계사, 갈현, 수암, 삼성, 삼막, 삼봉천 등 총 11개의 지방2급 하천(Table 1)과 오전, 백운, 삼성 등 3개의 저수지(Table 2)와 각각 일최대 300,000 m<sup>3</sup>를 처리하는 박달과 석수 하수처리장을 포함하고 있다. 본류의 유로연장은 17.91 km이고 유역면적은 127.13 km<sup>2</sup>에 이르며 경기도 의왕, 안양, 군포, 과천시 등이 포함되고 2003년 기준으로 약 98만명이 거주하고 있다. 2000년 기준으로 산림이 약 51.6%(침엽수림 18.3%, 혼합수림 33.3%)이며 도시지역이 38.3%, 농업지역이 7.5%로 구성되어 있으며, Fig. 2와 같이 도시지역 비율이 1975년에 7.8%에서 2000년에는 38.3%로 30.5%가 증가하였다. 대상유역의 지하수 취수량(한국수자원공사, 2001)은 2000년 기준으로 31.4 mm/년(= 연 총사용량/유역면적)이며, 중유역에 따라 Table 2와 같다. 특히 상류인 왕곡, 오전천 유역은 약 70.1 - 84.5 mm/년으로 전체 연평균 강우량의 7.5%에 해당되며 학의, 갈현천 유역은 44.8 - 69.6 mm/년으로 안양천 전체 평균인 26.2 mm/년과 비교하면 매우 높아 건기에 지하수위가 떨어져 있다. 유역의 경사는 학의천과 당정천을 제외하고는 대부분 약 1/100보다 크므로 비교적 가파르다. 유역의 토양도는 Fig. 3과 같으며 관악통(GnE2, 10.3%), 송산통(SND3, 11.0%), 오산통(OnD3, 20.0%), 청산통(CaE3, 10.1%)이 많은 비율을 차지하고 있다. 이

Table 1. Characteristics of the Anyangcheon Subwatersheds (2000)

Category		Stream length (km) *	Watershed area (km <sup>2</sup> )	Population		Landuse**						Groundwater withdrawal (2000) (mm/year)
				Total population (person)***	Population density (person/km <sup>2</sup> )	Urban		Forest		Rice paddy		
Name of subwatershed						Area (km <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (km <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (km <sup>2</sup> )	Ratio (%)	
Study watershed	AY	17.91	127.13	3,876,278	13,527	6.85	38.25	9.25	51.65	1.55	12.95	31.4
Wanggok	WG	3.82	3.78	7,484	1,980	0.26	6.96	3.08	81.51	0.35	9.43	84.5
Ojeon	OG	2.85	4.26	26,370	6,190	0.33	7.65	3.30	77.48	0.48	11.38	70.1
Dangjeong	DJ	4.02	5.33	84,930	15,934	3.04	57.09	1.48	27.73	0.60	11.21	16.2
Sanbon	SB	4.32	10.30	132,390	12,853	4.15	40.34	4.99	48.49	0.95	9.15	2.8
Hakwui	HU	9.26	44.55	311,709	6,997	10.16	22.82	25.60	57.47	7.00	14.70	44.8
Suam	SA	5.50	8.07	49,960	6,191	1.52	18.90	5.86	72.61	0.49	6.29	1.9
Samseong	SS	5.30	13.18	45,476	3,450	1.04	7.88	10.97	83.21	0.68	5.12	4.4
Sambong	SB1	2.76	4.59	23,695	5,162	0.53	11.52	3.16	68.91	0.53	11.48	18

\* From 1:25,000 DEM of the National Geographic Information Institute (NWII) in the year of 2000

\*\* From the NWII in the year of 2000

\*\*\* From the site of Korea National Statistical Office (www.nso.go.kr)

Table 2. Information of Reservoirs

Name of Reservoir	Subwatershed	Location	Capacity (m <sup>3</sup> )
Ojeon	Ojeon	East 127° 00' 10" North 37° 21' 13"	57,000
Backun	Hakui	East 127° 00' 10" North 37° 22' 43"	1,628,000
Samseong	Samseong	East 126° 56' 56" North 37° 25' 08"	30,000

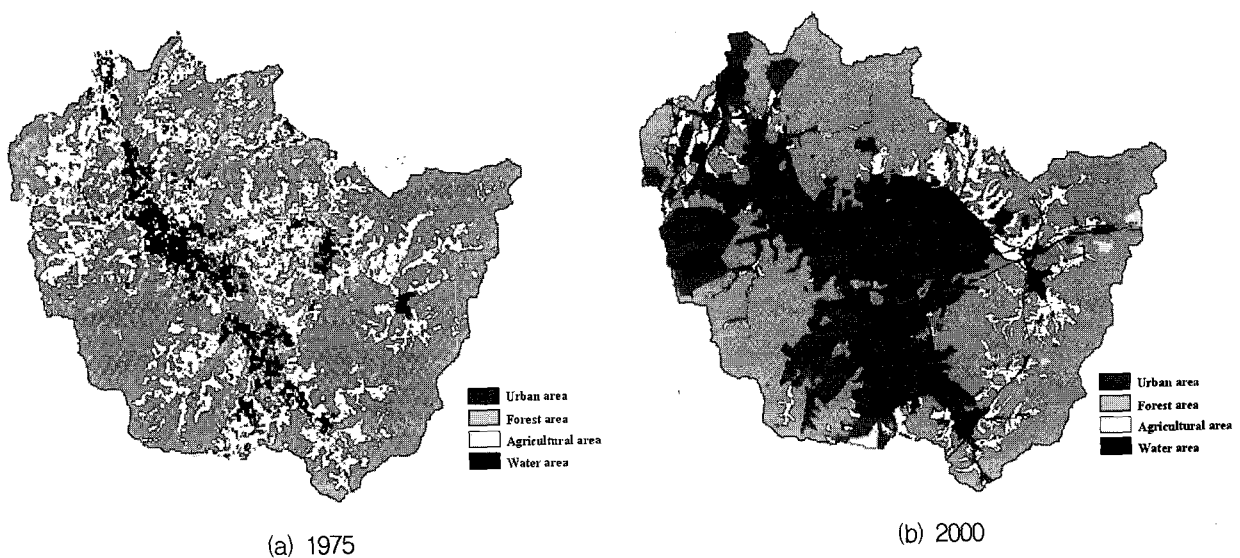


Fig. 2. Landuse Changes of the Study Watershed

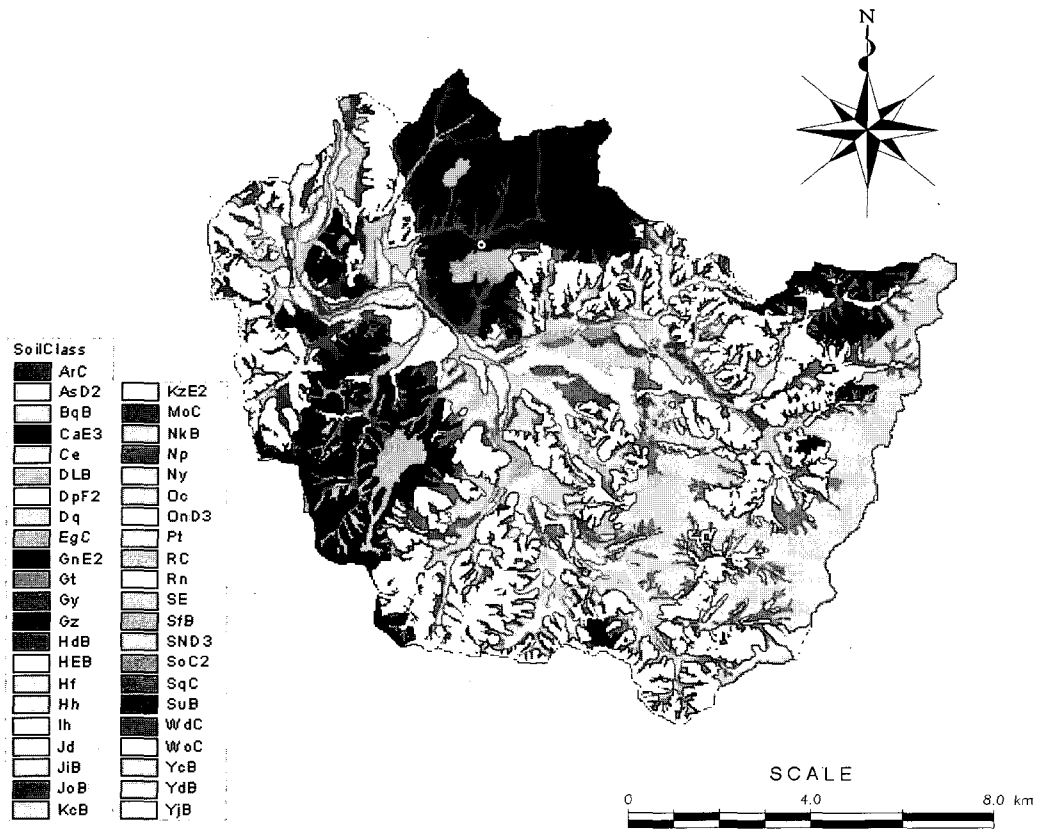


Fig. 3. Soil Map of the Study Watershed

중 청산통을 제외하고는 모두 모래(sand)의 구성성분이 50% 이상으로 유역 전체로 보면 점토(clay)가 18.6%, 실트(silt)가 33.4%, 모래가 48.0%로 구성되어 있다. 현재 대상유역에는 출구점인 기아대교와 상류지역인 옥우물교, 삼막천의 삼막3교, 당천천의 금정교, 수압천 하류에 '수자원의 지속적 확보기술개발 사업단' 중 '안양천 유역의 물순환 건전화 기술개발' 과제가 실시간 초음파 수위계를 설치하고 2004년 5월부터(기아대교는 2005년 1월부터) 15분 단위로 수위를 측정하여 웹(<http://anyang.river.or.kr>)으로 제공하고 있다.

### 3. SWAT모형의 구축

#### 3.1 입력자료의 구축

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형의 수치표고모형을 구축하기 위해 건설교통부 국토지리정보원에서 발행한 안양천 유역의 1999년도 1/25,000 수치지형도와 ArcView GIS Tool을 이용하였다. 수치지형도는 국토지리정보원의 국가기본 지리정보계획에 의하여 제작되었으며 본 연구에서는 안양천 유역을 모두 포함하는 1999년도 축척 1/25,000의 수치지형도를 사용하였다.

DEM의 격자크기를 결정하기 위해 다음과 같은 연구를 참고하였다. Chaubey et al.(2005)은 DEM의 해상도에 따른 SWAT 모형 결과의 불확실성에 대하여 연구한 결과 격자크기를 30 m × 30 m에서 100 m × 100 m, 150 m × 150 m, 200 m × 200 m, 300 m × 300 m, 500 m × 500 m, 1000 m × 1000 m 로 점점 증가시킬수록 모의결과의 상대오차도 점점 증가함을 확인하였고, 조효섭 등 (2003)은 수문모형에 적용을 위한 DEM 격자크기에 대해 연구한 결과 격자크기는 25 m × 25 m ~ 50 m × 50 m가 가장 적합함을 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 모의시간의 효율성과 모의결과의 정확성을 고려하여 격자크기를 30 m × 30 m로 하여 DEM을 구축하였다.

SWAT 모형에 사용될 토양입력자료를 구축하기 위해 농촌진흥청 농업과학기술원에서 발행한 2002년도 1/25,000의 수치정밀토양도와 농업 토양정보 시스템 (<http://asis.rda.go.kr>)의 자료 및 수리특성연산기 (hydraulic properties calculator; <http://wilkes.edu/~boram/soilwatr.htm>)를 이용하였고 토양입력자료의 격자크기는 DEM의 격자크기와 동일하게 30 m × 30 m로 하였다.

토지이용은 국토지리정보원에서 발행한 1999년도

1/25,000의 수치토지이용현황도와 ArcView GIS Tool 을 이용하여 토지이용 입력자료를 구축하였으며 격자크 기는 DEM의 격자크기와 동일하게 하였다.

### 3.2 검 · 보정

모형의 매개변수 민감도 분석은 이길성 등(2006c)의 결과를 사용하였는데 보정이 필요한 매개변수로는 침투 유량과 총 유출량 측면에서 모두 민감한 SOL\_AWC(available water capacity of the soil layer), GW\_DELAY(groundwater delay time), CN2(initial SCS runoff curve number for moisture condition II)가 선택되었다. 매개변수 보정은 GW\_DELAY의 1부터 31까지의 값에 SOL\_AWC와 CN2의 25가지 경우에 대해 수행하여 가장 높은 모형효율지수(Coefficient of Efficiency; Nash and Sutcliffe, 1970)를 갖는 매개변수를 추정하였다. 여기서 사용된 25가지 경우는 각각의 매개변수 허용변화범위에 대해 0%, 25%, 50%, 75%, 100%에 해당되는 값을 조합하였다.

$$\max R^2 = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2} \quad (1)$$

$$F_0^2 = \sum_{i=1}^n (M_{ob} - O_{ob,i})^2 \quad (2)$$

$$F^2 = \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - O_{ob,i})^2 \quad (3)$$

여기서,  $n$  은 자료의 개수,  $Q_{ob,i}$  는 관측시점  $i$  의 관측 값,  $M_{ob}$  는 관측값의 평균,  $Q_{sim,i}$  는 관측시점  $i$  의 모의 값이다.

각각의 대상유역(중상류, 왕곡/오전천, 학의천, 수암천, 삼성/삼막천, 삼봉천)에 대한 상세한 검 · 보정 결과는 신문주(2006)에 수록되어 있다. 여기서 당정, 산본, 수암천의 경우 매개변수를 보정하기 위한 자료가 존재하지 않기 때문에 인근 유역의 매개변수를 사용하였다.

즉 당정, 산본천 유역은 왕곡, 오전천 유역을 포함하는 최상류 유역의 매개변수를, 수암천 유역은 삼봉천 유역의 매개변수를 사용하였다. 사용된 매개변수는 Table 3 과 같다.

## 4. 연구결과

### 4.1 유역의 물순환 관련 요소 파악

유역에서 물의 움직임은 많은 물리, 화학, 생물학적 요소들에 의해 영향을 받는다. 따라서 이러한 유역내 특징과 과정을 이해하기 위해서는 다양한 유역내 요소는 물론 사용자, 사용량, 수요량 등에 대한 조사가 반드시 필요하다. Heathcote(1998)는 구체적인 요소들을 다음과 같이 제시했으며 본 연구에서 이들을 획득한 방법과 특징을 제시하면 다음과 같다.

#### (1) 물리적 특징과 지표면 형태(landform)

유역이 물리적 특징은 국립지리정보원(National Geographic Information Institute, NGII)으로부터 수치지형자료를 이용하여 ArcView를 사용해 분석하였다. 유역의 일반적인 특성은 Table 1에 나타난 바와 같다.

#### (2) 기상: 온도, 증발량, 강우량, 풍속, 습도

기상자료는 기상청(Korea Meteorological Association)으로부터 모두 획득이 가능하다. 특히 본 연구의 대상유역은 기상청에서 운영하는 수원 기상청으로부터 10 km 이내에 위치하고 있다. 대상유역은 연강우량 중 69.1%가 홍수기(6, 7, 8, 9월)에 집중되고 있으며 13.2%가 농번기인 4, 5월에 분포하고, 단지 17.7%만이 남은 10월부터 3월사이, 즉 6개월 동안에 발생한다.

#### (3) 토양, 침투량, 유출량

1:25,000 토양도는 국립농업과학원(National Institution of Agricultural Science, NIAS)으로부터 획득할 수 있다. 대상유역은 관악통(GnE2), 송산통(SND3), 오산통(OnD)이 50%이상 차지하여 48.0%의 모래(sand), 33.4%의 실트(silt), 18.6%의 점토로 구성되어 있다.

Table 3. Used Parameter Values of SWAT

Name of Subwatershed	GW-Delay (day)	SOL_AWC (mm/mm)	CN2
WG, OJ, DJ, SB	18	0.025	0
HU	16	-0.05	8
SS	18	-0.025	-4
SA, SB1	18	-0.025	4
Study Watershed	19	0.025	4

#### (4) 하천수: 하천수위

건기의 유출량은 수위-유량 관계곡선(rating curve)이 개발된 실시간 수위계에 의해서 15분단위로 계속되고 있다. '수자원의 지속적 확보기술개발 사업' 중 '안양천 유역의 물순환 건전화 기술개발' 과제에서 2003년에 삼막3교, 수암천, 금정3교, 2004년에 옷우물교, 2006년에 가야대교에 각각 설치하여 웹(<http://anyang.river.or.kr>)을 통해 제공하고 있다.

#### (5) 지하수: 지하수 수위, 지하수 취수량

대상유역에는 '수자원의 지속적 확보기술개발 사업' 중 '안양천 유역의 물순환 건전화 기술개발' 과제에서 설치한 2개의 지하수위 관측소(박달초등학교, 범계초등학교)가 있다. 지하수위의 장기 변동을 관찰하는데 활용될 수 있다. 또 한국수자원공사에서 매년 발행하는 지하수 조사연보를 통해 각 행정구역별 허가하여 사용하고 있는 지하수 취수량을 확인할 수 있다. 한국수자원공사(2001)를 토대로 유역별로 환산하여 단위면적당 사용량을 산정하면 Table 1에 나타낸 것과 같다. 대상유역의 경우 양곡, 오전, 학의천 유역의 지하수 사용량은 각각 84.5, 70.1, 44.8 mm/year에 이른다. 이 양은 대상유역 전체평균인 31.4 mm/year보다 많으며 연총강우량의 6.4%, 5.3%, 3.4%에 해당된다.

#### (6) 하천수질: 물리, 화학, 생물학적 인자

하천수질자료는 환경부에서 매일 측정하여 제공하는 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/weis>)을 통해 파악 할 수 있다. 대상유역의 경우 지자체와 시민단체들의 노력으로 최근 몇 년동안 하천수질이 급격히 향상되었다. 2005년의 경우 온도 19°C, BOD 9.2 mg/L, DO 8.1 mg/L, COD 11.1 mg/L, SS 8.4 m/L, TN 1.8 mg/L, TP 1.2 mg/L인데 반해 1993년에는 BOD 30.2 mg/L, DO 4.2 mg/L, COD 30.2 mg/L, SS 27.5 m/L, TN 10.5 mg/L, TP 1.1 mg/L이었다.

#### (7) 토지이용: 과거, 현재 상태

토지이용은 국가지리정보원의 토지이용자료로부터 ArcView를 사용하여 분석할 수 있다. 1975년과 2000년의 토지이용도는 Fig. 2에 나타난 바와 같으며 도시지역 비율이 25년 동안 무려 30.5%나 증가하였다.

#### (8) 식물, 동물들의 분포상태: 생물의 종의 수와 개체수

유역의 전반적인 동식물에 대한 분포는 국가기관이나 연구소에서 구체적으로 제공하는 경우는 거의 없다. 하지만 안양천의 경우 최정권(2004), 이기영(2006)에 의해 안양천 본류 주변에 대해 생태모니터링을 실시한 바

가 있다.

#### (9) 사회 경제적 지표: 인구, 홍수피해현황 등

대상유역의 경우 2004년 기준으로 약 98만명이 거주하고 있으며 최근 20년 중에서 가장 홍수피해를 심하게 입었던 해는 1987년으로 약 391억원이며 두 번째는 2001년 약 388억원, 세 번째는 155억원이다. 1982년부터 2001년까지 20년 동안 1154억원이 발생했으며 이중 도립천 유역이 260억원, 목감천 유역이 310억원 발생하였다(현대 Eng., 2005).

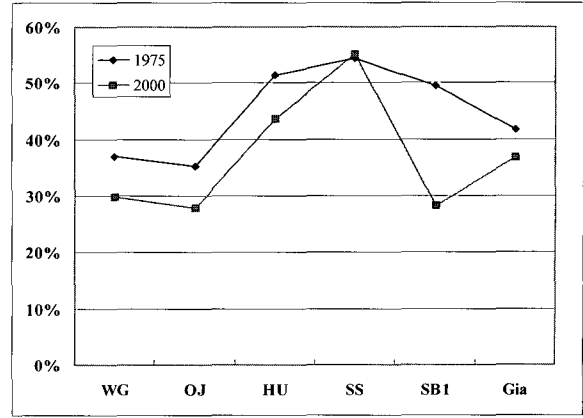
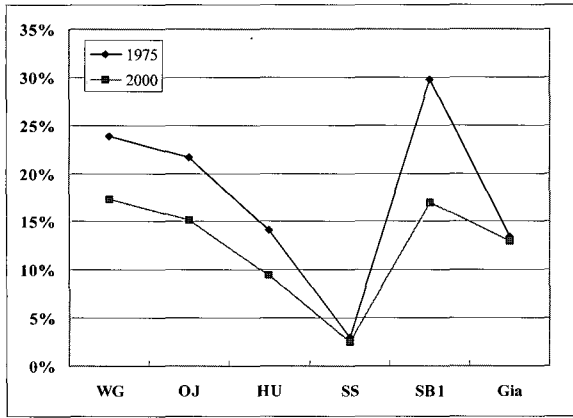
#### (10) 특이 사항과 특이 활동

현재 안양천 유역의 경우 최근 수년간 자연형 하천으로 복원하는 공사가 전 구간에 걸쳐 지속적으로 진행되고 있다. 또한 서울시 7개 자치구와 경기도 6개 자치시가 참여하는 '안양천 수질개선 대책협의회'가 2000년에 발족하여 현재까지 운영되고 있다. 안양천의 수질개선을 위해 여러 지방자치단체가 최초로 조직을 이루어 적극적으로 활동하고 있다. 이 외에서 안양천 살리기 네트워크를 포함한 10여개의 시민자치단체가 안양천 본류 및 지천의 수질개선을 위해 적극적으로 활동하고 있다. 즉 안양천 유역의 경우 수질개선에 대한 수요가 매우 높을 뿐만 아니라 공급하려는 시도도 다양하게 이루어지고 있다.

이상의 10가지 항목은 기존에 알려진 수치자료, 보고서, 통계자료 등을 통해 조사될 수 있는 사항이다. 하지만 이러한 자료만 가지고는 도시유역과 같은 대상유역의 경우에는 정확한 물순환 과정을 파악하기 힘들다. 따라서 앞선 연구에서는 수문모형을 이용한 물순환의 파악, 강우시 유출수의 농도를 직접 측정하여 산정한 유량가중 평균농도(Event Mean Concentration, EMC)의 파악을 제안하였다. 대상 유역의 경우 SWAT 모형을 이용하여 하천이 복개되지 않은 5개의 중유역과 전체유역에 대해 Fig. 4와 같이 물순환을 분석하였으며 강우시 실측한 수질자료를 이용하여 EMC를 산정하고 8개의 중유역과 전체유역에 대해 단위면적당 오염부하량을 Fig. 5와 같이 제시하였다(정은성 등, 2006).

### 4.2 문제점 도출 및 우선순위의 결정

대상유역의 경우 홍수피해, 하천 건전화, 수질오염 등의 문제가 동시에 발생한다. 하지만 본 연구에서는 선행연구에서 제안한 바와 같이 유역의 상태를 정량화하기 위해 복합계획법(composite programming)을 사용하여 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD), 건천잠재능(Potential Streamflow Depletion, PSD), 수



(a) Baseflow

(b) Total flow

Fig. 4. Hydrologic Simulation Results for 5 AY sub-watersheds and Entire Study Watershed

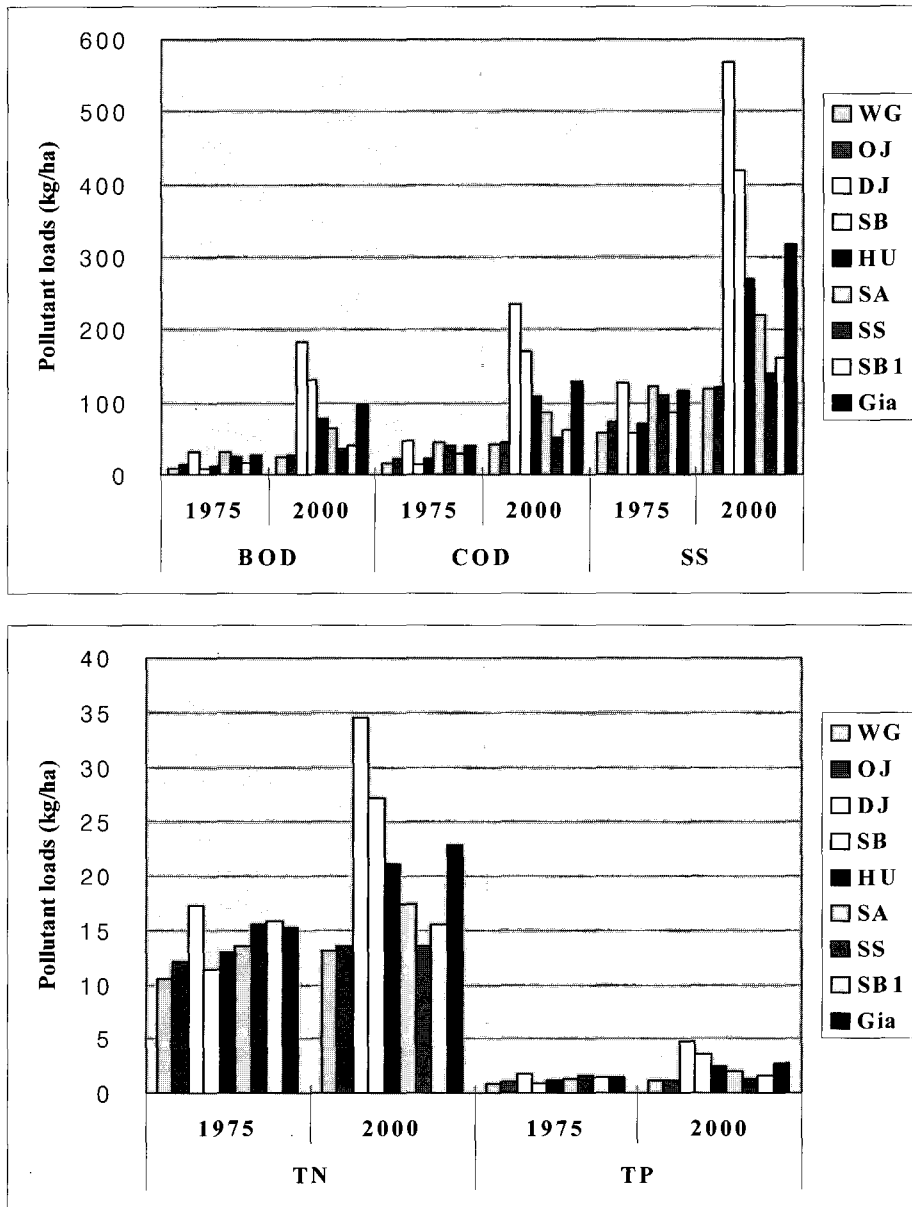


Fig. 5. Pollutant Loads per Unit Area for the 8 AY Sub-watersheds and the Entire Study Watershed

질오염잠재능(Potential Water Quality Deterioration, PWQD)을 산정하였다.

기존 연구에서는 PFD에 대해서만 지속가능한 개발 지표인 PSR(Pressure-State-Response) 모형을 이용하였으나 본 연구에서는 PSD와 PWQD에도 같은 원리를 적용하였다. PSR 모형은 환경적 압력(pressure), 환경의 상태 (state), 환경적 반응(response) 사이의 상호관계들을 해석하기 위한 목적으로 개발된 것으로 환경적 지표를 개발하는데 있어서 PSR 모형이 널리 사용되고 있다. 복합계획법을 사용하기 위해 사용된 가중치는 Table 4와 같고 산정한 결과는 Table 5와 같으며 이를 공간적으로 나타내면 Fig. 6과 같다. 유역별 상태를 “건강한(sound) 상태”, “수용가능한(acceptable) 상태”, “ 좋지 않은(poor) 상태”로 구분하면 다음과 같다.

- 나쁜 상태
  - 치수: DJ, SB, SA, SB1
  - 이수: WG, SA
  - 수질오염: 없음
- 수용가능한 상태
  - 치수: 없음
  - 이수: OJ, DJ, SB, SS, SB1
  - 수질오염: WG, DJ, SA, SB1
- 건강한 상태
  - 치수: WG, OJ, HU, SS
  - 이수: HU
  - 수질오염: WG, OJ, HU, SA, SB1

Table 4. Weighting Values ( $\beta_{i,j}$ ) of PFD, PSD, and PWQD Indices for the AY Watershed

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.4	0.1	0.4	0.6	0.2	0.2
2	1.0	0.1	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	-	-
3	1.0	0.15	0.15	0.1	0.05	0.05	0.2	0.1	0.2	0.8	0.2

\*  $i=1$  for PFD,  $i=2$  for PSD, and  $i=3$  for PWQD

Table 5. Comparative Results of PFD, PSD, PWQD, and WEI for the Study and the AY Watershed

Subject	PFD		PSD		PWQD		WEI	
	Index	Grade	Index	Grade	Index	Grade	Index	Grade
WG	0.25	S*	0.71	P	0.03	S	0.33	A
OJ	0.07	S	0.60	P	0.05	S	0.24	S
DJ	0.66	P	0.57	A	0.58	A	0.60	P
SB	0.64	P	0.55	A	0.45	A	0.55	A
HU	0.34	A	0.25	S	0.19	S	0.26	S
SA	0.61	P	0.73	P	0.13	S	0.49	A
SS	0.30	S	0.56	A	0.05	S	0.30	S
SB1	0.61	P	0.58	A	0.08	S	0.42	A
Study watershed	0.44	A	0.58	A	0.19	S	0.40	A
AY watershed	0.49	A	0.53	A	0.36	A	0.46	A

\* S: sound state, A: acceptable state, P: poor state

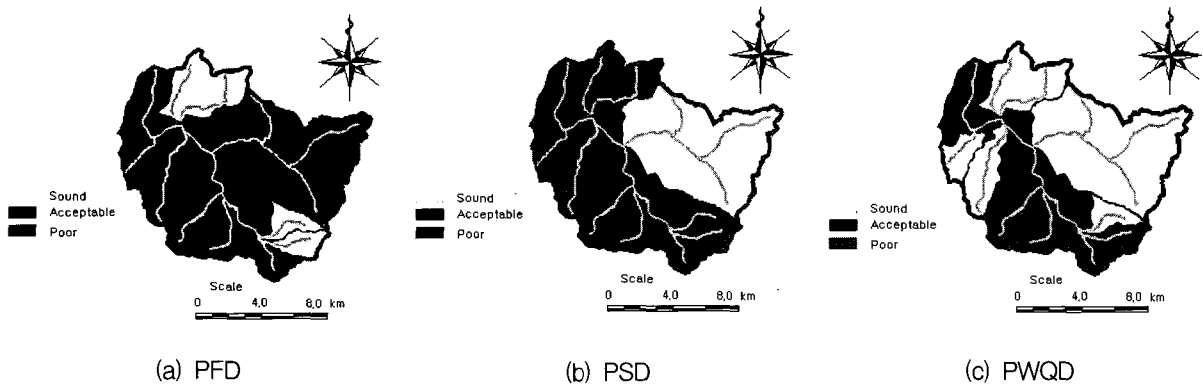


Fig. 6. Spatial Distribution of the AY Indices in the Year of 2000



### 4.3 목적 및 목표 수립

#### 4.3.1 목표(Goal)

대상유역의 경우 안양천 전체유역과 비교해 보면 PFD(= 0.44)와 PWQD(= 0.19)는 상대적으로 양호한 값을 보이는데 반해 PSD(= 0.58)의 경우는 더 큰 값을 가질 뿐만 아니라 수용가능한 상태와 나쁜 상태의 경계 값인 0.6과 가깝다. 특히 안양천 유역의 평균과 비교해 볼 때 PSD만 더 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 대상유역의 물순환 건전화에 위한 수자원 계획 및 관리를 위해서는 우선적으로 건전화 방안을 위한 계획이 필요하다. 물론 수질개선과 홍수피해 저감효과도 제약조건으로 고려해야한다. 건기의 하천에 물을 확보하면 하천 주변의 생태계의 건강도 확보될 수 있으므로 수질측면에서도 좋은 영향을 미칠 수 있다. 또한 건기의 하천수를 확보하기 위해서는 홍수기의 강우를 이용하는 방법이 많이 있으므로 홍수저감효과 또한 기대할 수 있다.

#### 4.3.2 목적(Objective)

선행연구에서 건전화 방지라는 목표를 위해 구체적으로 하천유지유량이라는 목적을 설정하였다. 대상유역의 경우 대부분의 주요지점에 대해 이삼희(2001)가 한국수자원학회(2005)의 설정방법에 따라 하천유지유량을 산정하였고, 또 당정 및 산본천 유역과 같은 복개하천의 경우에는 하천정비기본계획에서 제시한 바가 있으나, 모두 5년 이상 전의 것으로 현재의 하천 현황과 상태를 반영하지 못한다. 따라서 이길성 등(2006b)에서 설명한 바와 같이 PHABSIM 모형을 이용하여 산정한 생태유지유량과 갈수량을 비교하여 큰 값을 하천유지유량으로 결정하였다.

##### (1) 대표어종 및 서식처 적합도 곡선

대상하천의 대표 어종을 선정하기 위하여 해당 하천

의 우점종을 조사하였다. 이기영(2003)에서 조사한 결과를 살펴보면, 안양천 본류 기아대교 지점은 붕어, HU는 피라미, WG, OJ, SA는 버들치가 우점종으로 나타나 있으므로 이를 각 하천의 대표어종으로 선정하였다. DJ, SB, SS, SBI는 버들치를 대표어종으로 선정하였다. 한국수자원공사(1995)와 김규호(1999)가 제시한 대표어종의 서식처 수리조건은 Table 6과 같다.

##### (2) 수리모의

수리모의는 유량을 점차적으로 늘려가면서 그에 대한 수위와 유속을 모의하는 과정이다. 수리모의 수행을 위해 '안양천 유역종합치수계획'(현대 Eng., 2005)에서 구축한 HEC-RAS 모형의 횡단면 자료와 조도계수를 사용하였다. 수위모의는 기 구축된 HEC-RAS를 이용하여 수행하였으며 유속모의는 Manning 공식을 이용하는 PHABSIM(Physical HABitat SIMulation system; USGS, 2001) 모형의 VELSIM을 이용하여 수행하였다.

##### (3) 서식처 모의

서식처 모의는 수리 모의와 서식처 적합도 곡선을 결합하여 가용한 서식처를 양적으로 표현하는 과정이다. 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용하는 곱셈방법을 사용하여 복합 적합도(composite suitability)를 산정하고 각 셀의 표면적에 곱한 후, 이를 종합하여 가중가용면적이 가장 큰 값을 가지는 경우의 유량을 어류가 서식하는데 가장 양호한 생태유지유량으로 선정한다.

##### (4) 평균갈수량 산정

평균갈수량을 산정하기 위해 지역회귀기법(regional regression method)를 사용하였다. 상류부에 인위적 유량조절이 없는 6개 댐유역(소양강댐, 괴산댐, 대청댐,

Table 6. Habitat Suitability Criteria

Name of Fish	Water depth (cm)			Velocity (cm/s)		
	Spawning	Fry	Adult	Spawning	Fry	Adult
Rhynchocypris oxycephalus	10 ~ 20 (Apr., May)	20 ~ 30 (summer ~ autumn)	30 ~ 50 (spring ~ autumn)	10 ~ 30	20 ~ 40	30 ~ 120
Zacco platypus	10 ~ 30 (Apr., May)	10 ~ 40 (summer ~ autumn)	10 ~ 70 (spring ~ autumn)	10 ~ 30	10 ~ 40	20 ~ 60
Carassius auratus	20 ~ 50 (May, Jun.)	10 ~ 40 (summer ~ autumn)	30 ~ 200 (spring ~ autumn)	5 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30

Table 7. Instreamflow Requirements

(unit: CMS)

Name of Subwatershed	This Study							
	Drought flow (Sep. ~ Mar.)	Environmental flow						
		Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.
WG	0.074	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
OJ	0.079	0.5	0.5	0.9	0.9	0.9	1.2	1.2
DJ	0.090	0.5	0.5	0.9	0.9	0.9	1.2	1.2
SB	0.128	1.6	1.6	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
HU	0.288	1.2	1.2	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
SS	0.147	1.6	1.6	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
SA	0.112	1.6	1.6	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
SBI	0.082	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Study watershed	0.511	3.0	-	-	1.0	1.0	3.0	3.0

안동댐, 입하댐, 합천댐)과 9개 수위관측소 (이목정, 백옥포, 영양, 청송, 동곡, 고로, 이평교, 탄부교, 기대교) 유역을 이용하여 평균갈수량 회귀식을 산정하였으며 다음 Eq. (4)와 같다.

$$Q = 0.0357A^{0.55} \quad (4)$$

여기서,  $Q$ 는 평균갈수량(CMS),  $A$ 는 유역면적(km<sup>2</sup>)이다.

#### (5) 하천유지유량 산정

지역회귀기법에 의해 결정된 안양천의 평균갈수량과 생태유지유량을 비교하여 산정한 하천유지유량은 Table 7과 같다. 모든 하천에서 생태유지유량이 평균갈수량보다 크므로 4-10월은 생태유지유량을, 11-3월은 평균갈수량을 하천유지유량으로 설정하였다.

#### 4.4 대안의 구성

대상유역에 대해 하천의 건천화 방지를 위한 대안의 종류는 다음과 같다.

- 현재상태 유지 (do nothing)
- 저류지 건설
- 지하수 취수 금지
- 기존 저수지 재개발
- 지하철 용출수 활용
- 침투증진시설
- 유역간 이동: 하수처리장 방류수 재이용
- 분류식 하수관거
- 상류지역에 소규모 하수처리장 건설

이 대안의 대상유역에 대해 구체적인 적용 계획은 수립하면 Table 8과 같다.

#### 4.5 대안의 선별

4.4절에서 제안된 대안들을 기술적(technical), 경제적(economic), 환경적(environmental) 가능성(feasibility) 측면에서 정성적으로 검토하여 실행가능한 대안을 선정하면 Table 9와 같다. 이 과정에서는 일반적으로 특정 대안이 대상 유역에 적용할 수 있는지 여부만 판단하는 과정으로 현장답사 및 문헌조사 등을 통해 검토하여 결정한다. 후보 대안을 나타내면 Fig. 7과 같다.

#### 4.6 효과분석

4.5절에서 제안된 대안들의 정량적인 효과분석을 위해 분포형 수문모형인 SWAT을 이용하였다.

3개의 저수지(OJ, HU, SS) 재개발, 2개의 신규저수지(WG, SA) 개발, 3개의 복개하천(DJ, SB, SA) 복원, 5개의 유역간 수자원 이송(하수처리장 처리수 재이용; HU, SS(2지점), SA, SBI), 1개의 지하철 용출수 재이용(HU) 대안들의 모의 결과는 Table 10에 나타난 바와 같다. 각각의 대안은 2000년부터 2005년에 대해 6년간 수행하였으며 2000년 자료는 안정화를 위해 사용하였으므로 2001년부터 2005년까지 5년간의 모의결과를 평균하여 사용하였다.

#### 4.7 대안 결정

대안의 분석결과를 이용하여 Table 10과 같이 대안별 우선순위를 결정하였다. 이때 사용된 효과지수 산정 방식은 앞선 연구에서 제시한 것을 사용하였으며 가중치는 동일하게 1/3로 하였다. 도출한 우선순위는 다음과 같다. 또 하천유지유량은 계절별로 다르게 결정되나 여기서 대안별 비교를 위해서는 각 소유역의 특성을 반영할 수 있는 갈수량을 사용하였다. 효율지수는 이상점

Table 8. Specific Description of Feasible Alternatives

Alternatives	Sub-watershed	Description	Name
Reservoir redevelopment	OJ	- Construction of sluice gate - Proper operation (release: 0.01 CMS from Oct. to May)	R1
	HU	- Proper operation (release: 0.1 CMS from Oct. to May)	R2
	SS	- Proper operation (release: 0.01 CMS from Oct. to May)	R3
New retention pond	DJ	- Capacity: 60,000 m <sup>3</sup> - Proper operation (release: 0.01 CMS from Oct. to May)	N1
	SB		N2
	WG		N3
	SS		N4
	SA		N5
	SB1		N6
Restoration of covered stream	DJ	- To remove roads and restore the stream - Covered length: 1.59 km - Construction of sewers	S1
	SB	- To remove roads and restore the stream - Covered length: 2.74 km - Construction of sewers	S2
	SA	- To remove roads and restore the stream - Covered length: 0.645 km - Construction of sewers	S3
Inter-basin transfer (reuse of WWTP effluent)	WG	- To transfer highly-treated wastewater of WWTP - Maximum quantity is 21,000 m <sup>3</sup> /day but used quantity is dependent upon the actual operation result of WWTP	I1
	OJ		I2
	DJ		I3
	SB		I4
	HU		I5
	SS(1)		I6
	SS(2)		I7
	SA		I8
SB1	I9		
Use of groundwater collected by subway stations	HU	- To transfer groundwater collected by subway station into the stream - Average quantity: 3,720 m <sup>3</sup> /day	U1

까지의 거리로 값이 작을수록 좋은 대안이다.

- I8 > I9 > I6 > I7 > R2 > S1 > S3 > N3 > I5 > S2 > N5 > R1 > U1 > R3

대안들을 지수에 따라 그룹별로 분류하면 건전한 대안(0-0.3)으로는 I8, 수용가능한 대안(0.3-0.6)으로는 I9, I6, I7, R2, S1, S3, N3, I5, S2, N5, 좋지 않은 대안(0.6-1)은 R1, U1, R3으로 분류 될 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구는 선행연구인 이길성 등(2006b)에서 제안된 건천화 방지를 위한 유역통합관리 절차를 안양천 중상류 유역에 적용한 결과이다. 특히 대상유역에 대한 물순환 흐름을 파악하기 위한 구체적인 자료 및 취득방법과 모형을 이용한 분석, 중유역별 상태파악 및 대안 선택에 PSR 모형을 사용하여 지속가능성에 대한 개념이 반영하였으며 지수산정 방식은 다단계 다기준 의사결정

Table 9. Screening Results According to Three Criteria

Name of Alternative	Technical Feasibility	Economic Feasibility	Environmental Feasibility	Selection
R1	Yes	Yes	Yes	Yes
R2	Yes	Yes	Yes	Yes
R3	Yes	Yes	Yes	Yes
N1	No	Yes	Yes	No
N2	No	Yes	Yes	No
N3	Yes	Yes	Yes	Yes
N4	No	Yes	Yes	No
N5	Yes	Yes	Yes	Yes
N6	No	Yes	Yes	No
S1	Yes	Yes	Yes	Yes
S2	Yes	Yes	Yes	Yes
S3	Yes	Yes	Yes	Yes
I1	Yes	No	Yes	No
I2	Yes	No	Yes	No
I3	Yes	No	Yes	No
I4	Yes	No	Yes	No
I5	Yes	Yes	Yes	Yes
I6	Yes	Yes	Yes	Yes
I7	Yes	Yes	Yes	Yes
I8	Yes	Yes	Yes	Yes
I9	Yes	Yes	Yes	Yes
U1	Yes	Yes	Yes	Yes

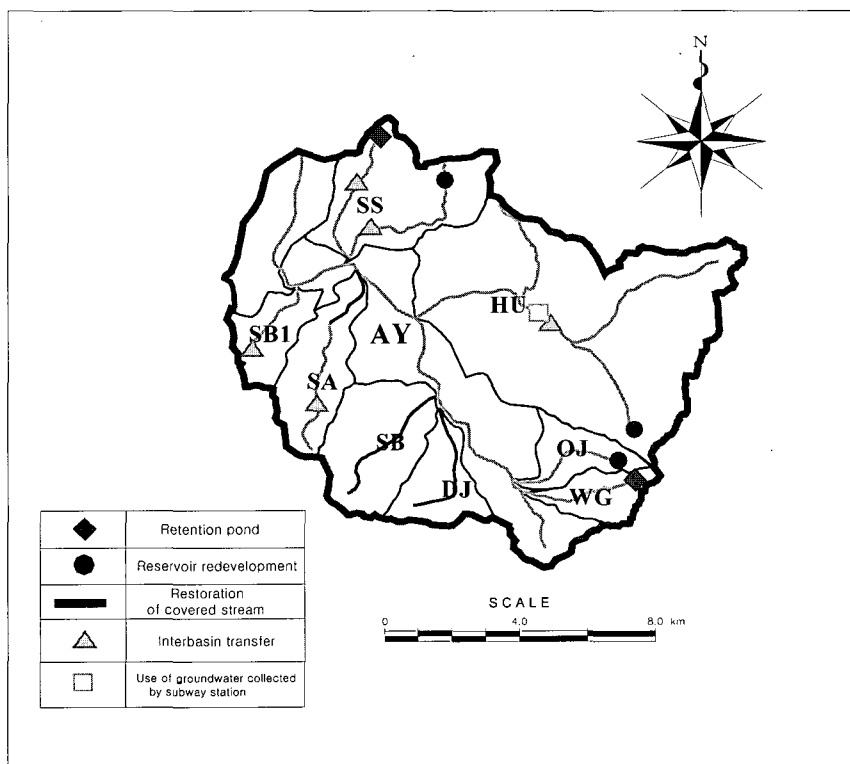


Fig. 7. A Master Plan from the Pre-feasibility Analysis for the 8 AY Sub-watersheds

Table 10. Procedure of Priority Ranking Selection

Name	Pressure	State	Response								Evaluation Index	Rank
	Population	PSD	Target Instream Flow (CMS)	Drought Flow			Low Flow			Average Efficiency		
				Before (CMS)	After (CMS)	Efficiency	Before (CMS)	After (CMS)	Efficiency			
R1	0.179	0.60	0.009	0.010	0.011	1.3%	0.004	0.015	13.9%	7.6%	0.614	12
R2	0.203	0.25	0.196	0.060	0.157	33.7%	0.105	0.205	34.7%	34.2%	0.582	5
R3	0.096	0.56	0.090	0.000	0.007	4.8%	0.003	0.012	6.1%	5.4%	0.675	14
N3	0.052	0.71	0.009	0.001	0.011	13.5%	0.004	0.014	13.5%	13.5%	0.565	8
N5	0.179	0.73	0.090	0.000	0.006	5.4%	0.002	0.012	8.9%	7.1%	0.585	11
S1	0.471	0.57	0.013	0.000	0.000	0.0%	0.000	0.002	2.2%	1.1%	0.575	6
S2	0.379	0.55	0.026	0.000	0.001	0.8%	0.000	0.008	6.3%	3.5%	0.598	10
S3	0.179	0.73	0.018	0.000	0.002	1.8%	0.000	0.014	12.5%	7.1%	0.558	7
I5	0.203	0.25	0.196	0.060	0.139	27.4%	0.105	0.184	27.4%	27.4%	0.629	9
I6	0.096	0.56	0.090	0.000	0.040	27.2%	0.002	0.068	44.9%	36.1%	0.463	3
I7	0.096	0.56	0.090	0.000	0.029	19.7%	0.002	0.063	41.5%	30.6%	0.501	4
I8	0.179	0.73	0.018	0.002	0.046	39.3%	0.014	0.078	57.1%	48.2%	0.274	1
I9	0.148	0.58	0.010	0.009	0.026	20.7%	0.017	0.068	62.2%	41.5%	0.399	2
U1	0.203	0.25	0.196	0.060	0.123	21.9%	0.105	0.168	21.9%	21.9%	0.667	13

알고리즘 중 하나인 복합계획법을 사용하는 구체적인 방법을 제시하였다. 또한 대상유역에 대해 구체적인 건천화 방지 대안을 제시하였으며 SWAT 모형을 이용하여 각각에 대해 물순환 개선 효과분석을 수행하였고 이 결과를 바탕으로 본 연구에서 제안한 효과지수 식을 사용하여 대안의 우선순위를 결정하였다.

본 연구는 각 대안별로 소요되는 건설비용과 유지비용 등이 전혀 고려되지 않은 수요자 중심의 계획이므로 향후 공급자까지 고려한 통합적인 계획을 수립하는데 활용될 수 있다. 또한 각 대안별로 건천화 방지만을 위한 효과를 토대로 순위를 산정하여 S1, S2, S3과 같이 하천의 수질, 경관 등 다양한 측면에서 좋은 효과가 있는 대안들이 저평가되었으므로 향후에 치수와 수질관리 측면에서의 효과까지 고려할 수 있는 계획 수립법이 필요하다.

### 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 뜻

을 포함합니다.

### 참고 문헌

김규호 (1999). "하천 어류 서식 환경의 평가." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제33권, 제2호, pp. 10-23.

남원 Eng. (2002). 안양천 하천정비 기본계획. 서울지방국토관리청, 건설교통부.

삼안, 동호 (2005). 안양천 외 17개 하천정비 기본설계 보고서(안). 서울특별시.

신문주 (2006). SWAT 모형을 이용한 안양천 유역의 유량확보와 수질개선에 대한 방안. 서울대학교 석사학위논문.

심명필 (2003). 지속가능한 하천수 개발. 인하대학교, 과학기술부.

이기영 (2003). 안양천 살리기 종합대책. 경기개발연구원, 경기도.

이기영 (2006). 2005년 안양천 모니터링. 경기개발연구원, 안양시.

이길성 (2004). 안양천 유역의 물순환 건전화 기술적용. 서울대학교, 과학기술부.

이길성, 정은성, 김영오 (2006a). "도시 유역 관리를 위

- 한 통합적인 접근방법.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제2호, pp. 161-178.
- 이길성, 정은성, 김영오, 조탁근 (2006b). “도시유역의 건천화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획: 1. 방법론.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제11호. pp. 935-946.
- 이길성, 정은성, 신문주, 김영오 (2006c). “SWAT 모형을 이용한 도시하천 상류유역의 하천유지유량 산정 방안.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제8호, pp. 703-716.
- 이삼희 (2001). **안양천 살리기 종합계획**. 한국건설기술연구원, 안양시.
- 정은성, 이길성, 신문주 (2006). “SWAT 모형과 EMC 산정결과를 이용한 안양천의 수량 및 수질특성.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제22권, 제4호, pp. 648-657.
- 조효섭, 정관수, 김재한 (2003). “GIUH적용을 위한 DEM 격자크기 및 Threshold Area의 민감도 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 799-810.
- 최정권 (2004). **안양천 생태환경 모니터링**. 안양시.
- 한국수자원공사 (1995). **하천유지유량 결정방법의 개발 및 적용**. 건설교통부
- 한국수자원공사 (2001). **지하수조사연보**. 건설교통부.
- 한국수자원학회 (2005). **하천설계기준·해설**. 건설교통부.
- 현대 Eng. (2005). **안양천 유역종합치수계획 보고서**. 서울지방국토관리청, 건설교통부.
- Chaubey, I., Cotter, A.S., Costello, T.A., and Soerens, T.S. (2005). “Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty.” *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 621-628.
- Heathcote, I.W. (1998). *Integrated Watershed Management*. John Wiley & Sons, New York.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models, part 1 - A discussion of principles.” *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- US Geological Survey (2001). *PHABSIM for Windows, User Manual and Exercises*. Midcontinent Ecological Science Center, Fort Collins, Colorado.

(논문번호:06-70/접수:2006.07.06/심사완료:2006.10.24)