

기후변화 및 도시화를 고려한 수자원관리 대안의 효과 분석

Effectiveness Analysis of Alternatives for Water Resources Management Considering Climate Change and Urbanization

박 경 신* / 정 은 성** / 김 상 욱*** / 이 길 성****

Park, Kyungshin / Chung, Eun-Sung / Kim, Sang-Ug / Lee, Kil Seong

Abstract

This study derived the analysis results of alternatives for integrated watershed management under urbanization and climate change scenarios. Climate change and urbanization scenarios were obtained by using SDSM (Statistical Downscaling Method) model and ICM (Impervious Cover Model), respectively. Alternatives for the Anyangcheon watershed are reuse of wastewater treatment plant effluent, and redevelopment of existing reservoir. Flow and BOD concentration duration curves were derived by using HSPF (Hydrological Simulation Program - Fortran) model. As a result, low flow (Q_{99} , Q_{95} , Q_{90}) and BOD concentration (C_{30} , C_{10} , C_1) were very sensitive to the alternatives comparing to high flow (Q_{10} , Q_5 , Q_1). Although urbanization makes the hydrological cycle distorted, effective alternatives can reduce its damage. The numbers of days to satisfy the instreamflow requirements and target water quality were also sensitive to urbanization. This result showed that the climate change and urbanization should be considered in the water resources/watershed and environmental planning.

keywords : Alternative, Anyangcheon, Climate change, HSPF, Urbanization

요 지

본 연구에서는 도시화와 기후변화에 대한 미래시나리오를 구성하고 각각의 시나리오별로 수자원 관리 대안들에 대한 효과분석을 수행하였다. 기후변화 시나리오는 SDSM (Statistical Downscaling Method) 모형을 이용하여 구축하였으며 도시화는 불투수면 모형(Impervious cover model, ICM)을 이용하였다. 안양천 유역에 대해 하수처리수 재이용, 저수지 재개발 대안들을 유황곡선(flow duration curve)과 BOD 농도지속곡선(concentration duration curve)의 변화측면에서 연속유출모형인 HSPF (Hydrological Simulation Program - Fortran) 모형을 이용하여 분석하였다. 그 결과, 시나리오별 하천 유출량에 대한 대안 효과의 차이가 고수량 (Q_{10} , Q_5 , Q_1)에 비해 저수량(Q_{99} , Q_{95} , Q_{90})과, 수질오염(C_{30} , C_{10} , C_1) 측면에서 크게 나타남을 알 수 있다. 즉 도시화는 물 순환을 크게 악화시키거나 대안의 적용이 이러한 현상을 크게 막아줄 수 있다. 또한 목표 유지유량 및 목표 수질 만족일수는 도시화에 대해 매우 민감한 것으로 나타났다. 따라서 향후 수자원 관리 대안을 수립할 때 기후변화와 도시화에 대한 분석을 포

* (주) 현대산업개발 사원, 공학석사

Hyundai Development Company, MS

** 교신저자, 정회원, 서울대학교 공학연구소 선임연구원, 공학박사

Corresponding Author, Seoul National University, Engineering Research Institute, Researcher, PhD

(e-mail: cool77@snu.ac.kr)

*** 정회원, 국회입법조사처 국토해양팀, 입법조사관, 공학박사

National Assembly Research Service, Land, Transport and Maritime Affairs Team, Legislative Researcher, PhD

**** 정회원, 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수, 공학박사

Seoul National University, Civil and Environmental Engineering, Professor, PhD

함시키는 것이 바람직하다.

핵심용어 : 안양천, 기후변화, 대안기술 평가, 도시화, HSPF

1. 서론

탄소중심의 성장과 무분별한 개발로 인해 지구의 온실효과는 점점 증가하고 있고, 지구온난화에 의한 기후변화는 지구 물 순환 전반에도 영향을 줄 것이다. 더 나아가 최근 지속적으로 증가하고 있는 불투수면 비율은 이러한 영향을 가중시키고 있다. 현재의 추세로 보았을 때 수자원 및 환경 관련 계획들의 효과도 변화될 것으로 예상된다. 하지만 기 수립된 국가 하천, 유역, 환경 관련 계획들은 도시화와 기후변화에 대한 미래 예상 시나리오를 거의 고려하지 않고 있다.

기후변화와 도시화로 인한 수자원 및 환경에 대한 영향에 대한 관심은 매우 높아졌으며 이를 동시에 고려하여 물 순환을 분석하기 위한 연구가 전세계적으로 이루어지고 있다 (Ewen and Parkin, 1996; Bronstert *et al.*, 2002; Asselman *et al.*, 2003; Chang, 2003; Legesse *et al.*, 2003; Lee and Chung, 2007; 안소라 등, 2008; Hejazi and Moglen, 2008; Juckem *et al.*, 2008; Semadeni-Davies *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2008; Cuo *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2009; Ma *et al.*, 2009). 하지만 이러한 내용을 계획과 관리를 위한 의사결정에 직접 사용한 연구는 드물다. 이길성 등(2005)은 미래 계획된 도시화 시나리오를 반영하여 하수처리수 재이용 대안에 대한 효과분석을 SWMM (Storm Water Management Model) 모형을 이용하여 수행하였지만 수질개선 측면과 기후변화에 대한 내용은 반영하지 않았다. Sulis *et al.* (2009)은 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 기후변화 시나리오에 대해 물 분배 및 할당을 위한 대안들의 효과를 분석한 바 있지만 도시화와 수질 개선에 대한 부분은 포함하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 도시화와 기후변화가 발생하는 경우를 미래 시나리오로 구성하고 수자원 관리를 위한 대안들에 대해 수량 및 수질 측면에서 분석하였다. 기후변화와 도시화 분석을 통한 미래 시나리오 구성과 대상유역에 대한 연속유출모의 모형인 HSPF (Hydrological Simulation Program - Fortran; Bicknell *et al.*, 2001) 모형의 구축은 선행연구인 박경신 등 (2009)의 결과를 사용하였다.

2. 대상유역 및 적용대안

안양천은 한강의 제1지류로 유역면적은 총 287.15 km²

이며 유로 연장은 32.5 km이다. 안양천은 국가하천 구간(한강과 안양천이 합류하는 하구~경부분선 철교의 수암천 합류지점)과 지방하천 구간으로 이루어져 있으며, 왕곡천, 오전천, 당정천, 산본천, 학의천, 수암천, 삼봉천, 삼성천, 시흥천, 목감천, 도림천 등 총 11개의 지방하천 제1지류를 포함한다. 이에 해당하는 유역의 행정구역은 경기도 7개시(과천시, 의왕시, 군포시, 안양시, 광명시, 시흥시, 부천시)와 서울시 7개구(강서구, 양천구, 영등포구, 구로구, 동작구, 관악구, 금천구)이다. 안양천 유역의 위치는 서울의 남서쪽으로 동경 126° 47' ~127° 04', 북위 37° 18' ~37° 33'이다. 경기도 의왕시 지시대 고개에서 발원하여 북측으로 유하하여 흐르다가 안양시를 관류하여 학의천과 합류하고, 서울을 관통하면서 목감천 및 도림천과 합류하여 최종적으로 한강으로 흘러들어가는 전형적인 도시하천으로 유역도는 Fig. 1과 같다.

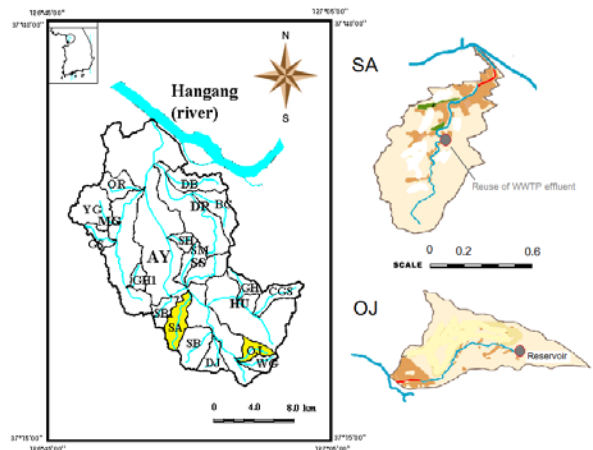


Fig. 1. Map of the Study Watershed

본 연구에 적용되는 유역은 오전천과 수암천으로 각각 유역면적이 4.26 km², 8.07 km²이고 유로연장은 2.85 km, 5.50 km이다. 두 유역 모두 경기도에 포함되며 도시지역 면적 비율이 각각 11.4 %, 25.4 %로 안양천의 다른 유역들에 비해 도시화가 덜 진행되었다. Fig. 1과 같이 왕곡천은 안양천 최상류에서 합류되며 수암천은 중류에서 합류된다.

본 연구에서 사용한 대안은 정은성 등(2008)에서 안양천 유역에 제시한 대안 중 Fig. 1과 같이 오전천(OJ)과 수암천(SA)의 하수처리수 재이용, 기존 저수지 재개발 대안들에 대해 검토하였다. 오전천 유역 상류에는

총 저수용량이 약 63,000 m³ (유효 저수용량 59,000 m³) 인 오전저수지가 있는데 본래 농업용으로 1960년대에 건설되었으나 유효저수용량이 크게 줄었고 최근 인근지역이 모두 도시화되면서 더 이상 본래 기능을 유지하기 힘든 상태이다. 특히 기후변화로 인해 강우량이 늘어나고 계절적 편차는 심해졌을 뿐만아니라 건기 유지유량에 대한 수요가 높아져서 현재의 월류 방식이 아닌 적당한 시기에 일정량을 방류하는 운영률이 절실히 요구된다. 따라서 본 연구에서는 오전천 상류에 위치하고 있는 오전 저수지의 방류량을 일정하게 유지시키는 대안을 고려하여 하천의 유량 확보와 수질 개선에 대한 효과를 분석하였다. 방류량은 이길성 등(2006)에서 제시한 오전천의 유량 확보 방안으로 산정한 0.01 cms를 적용하였다. 수암천 유역에 적용하는 대안은 안양하수처리장에서 발생하는 처리수를 고도처리하여 수암천에 방류하는 대안을 적용하였다. 방류량은 10,000 m³/일이며 평균 BOD 농도는 현재 고도처리수 농도와 같이 4.7 mg/L를 적용하였다.

3. 연구방법

본 연구는 Fig. 2와 같이 크게 8단계로 구성되어 있다. 1단계에서는 많은 GCM (General Circulation Model) 모형(HadCM3, CGCM3, CSIRO Mk2, ...) 중 대상유역에 적합한 모형을 선택한다. 2단계에서는 정부간 기후변화 협의회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 온실가스 배출에 관한 특별보고서(Special Report on Emission Scenario, SRES)의 시나리오(A1C, A1G, A1B, A1T, A2, B1, B2, ...) 중 적절한 시나리오를 선택한다. 3단계에서는 시나리오별 GCM 자료를 일단위로 축소화하기 위해 SDMS (Statistical DownScaling Method; Wilby *et al.*, 2002)

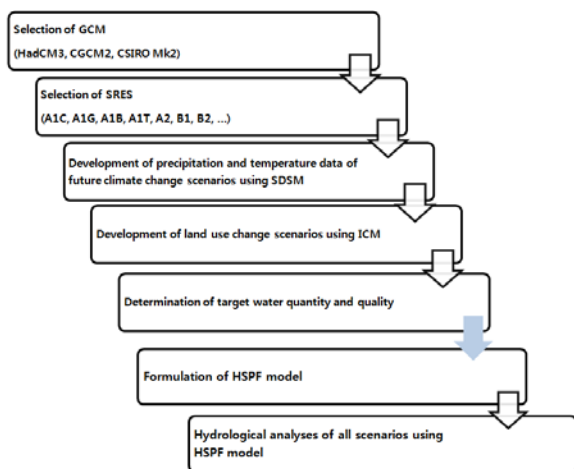


Fig. 2. Procedure of This Study

모형을 이용하여 일별 온도와 강우 자료를 생성한다. 4 단계에서는 불투수면 모형(Impervious Cover Model, ICM; CWP, 2005)을 이용하여 대상유역의 미래 불투수면적 비율 시나리오를 생성한다. 5단계에서는 대상유역에 대한 대안의 효과를 확인하기 위해 목표 유지유량과 목표 오염물질 농도를 생성한다. 6단계에서는 대안의 평가를 위해 사용할 연속유출 모의모형을 구축한다. 7 단계에서는 현재 기상 조건에서 대안들의 효과를 분석하였고 8단계에서는 미래 기후변화와 도시화 시나리오에 대해 분석한다. 1-4단계 적용 결과는 4.1절에 5-8단계 적용 결과는 4.2절에 각각 제시하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 미래 시나리오 구성

본 연구에서는 기후변화 시나리오 구성을 위해 박경신 등 (2009)의 연구결과를 이용하였다. 전 세계적으로 활발하게 사용되고 있는 CGCM3 (Canadian Global Coupled Model) 모형 결과를 이용하였고(1단계) 온실가스 배출시나리오는 A1B, A2 시나리오를 선택하였다(2단계). 기후변화 시나리오를 HSPF 모형에 적용시키기 위하여 다중회귀분석을 기반으로 한 통계학적 축소기법 모형인 SDSM 모형을 이용하여 월단위 자료로 제공되고 있는 GCM 결과값을 일단위 자료로 축소화하였다(3단계). 기후변화 시나리오를 작성한 대상 지점은 수원 관측소로 2001년부터 2100년까지의 강수와 기온 자료를 생성하였다. Mann-Kendall 검정을 통하여 경향성을 분석한 결과 수원관측소의 연평균 기온은 대상기간동안 A1B 시나리오에서 약 2.0°C 증가한 13.7°C, A2 시나리오는 약 2.4°C가 증가한 14.1°C로 나타났다. 수원관측소의 과거 평균연총강수량이 1,312.5 mm이었다. A1B 시나리오는 과거에 비해 약 360 mm가 증가한 1,679.5 mm이며, A2 시나리오는 약 500 mm가 증가한 1,803.6 mm로 나타났다. 본 연구에서는 현재 시나리오를 포함하여 총 3개의 기후변화 시나리오를 고려하였다. SDSM 모형의 검증 결과와 적용결과는 박경신 등(2009)에 구체적으로 제시되어 있다.

도시화에 대한 시나리오 구성은 미국의 유역보존센터(Center for Watershed Protection, CWP)의 불투수율이 수질에 영향을 주는 정도를 나타낸 ICM 모형을 이용하였다. 불투수면 모형에서 분류한 4가지의 등급(1등급: 0-11 %, 2등급: 11-25 %, 3등급: 25-60 %, 4등급: 60 % 이상)에 따라 다음과 같이 시나리오를 구성하였다.

C1: 현재상태 유지

C2: 각 소유역별 불투수면적 단계 1단계 상승
 C3: 각 소유역별 불투수면적 단계 2단계 상승

오전천의 불투수면 비율이 11.4 %, 수암천이 25.4 % 이므로 오전천은 2등급(11-25 %), 수암천은 3등급(25-60 %)에 해당된다. 따라서 오전천은 C1, C2 (불투수면 25 % 가정), C3 (불투수면 60 % 가정)가 가능하며 수암천은 C1, C2 (불투수면 60 % 가정)가 가능하므로 본 연구에서는 각 하천별로 이러한 시나리오를 포함하였다(4단계).

4.2 시나리오별 대안의 평가

4.2.1 목표 유지유량 및 목표 수질 설정

5단계를 위해 사용된 대상유역의 목표 유지유량과 목표 수질은 이길성 등(2006)이 제시한 값을 이용하였다. 목표 유지유량은 수문학적 갈수량과 월별 생태유지유량을 비교하여 큰 값으로 산정하였으며 목표 수질은 해당 하천의 담당 지자체에서 지정하고 있는 BOD 농도로 하였다. 오전천의 경우 0.079 cms (11월~3월), 0.5 cms (4, 5월), 0.9 cms (6, 7, 8월), 1.2 cms (9, 10월)로 설정되었고, 수암천의 경우 0.09 cms (11월~3월), 0.26 cms (4, 5월), 0.46 cms (6~8월), 0.6 cms (9, 10월)로 설정되었다. 목표 수질은 두 하천 모두 BOD 3 mg/L로 설정하였다.

4.2.2 대안의 평가

Hejazi and Moglen (2008)은 기후변화와 도시화가 물 순환에 미치는 영향을 분석하기 위해 저수량(low flow)의 변화에 대해 99 %, 95 %, 90 % 유향을, 고수량(high flow)의 변화에 대해 10 %, 5 %, 1 % 유향을

이용하였다. 본 연구에서도 대안의 물 순환 측면에서 효과분석을 위해 유향곡선(flow duration curve)과 BOD 농도지속곡선(concentration duration curve)을 이용하였다. 치수를 위해 고수량인, 10 %, 5 %, 1 % 유향(Q₁₀, Q₅, Q₁)을 분석하였고, 이수를 위해 저수량인, 99 %, 95 %, 90 % 유향(Q₉₉, Q₉₅, Q₉₀)과 수질관리를 위해 농도 지속곡선에서 30 %, 10 %, 1 %의 농도값(C₃₀, C₁₀, C₁)을 대안의 평가기준으로 사용하였다. 더 나아가 목표 유지유량(이길성 등, 2006)과 목표수질 만족일수를 산정하여 각 개안별, 시나리오별로 제시하였다.

본 연구에서는 박경신 등(2009)이 기후변화와 도시화에 대한 안양천 유역의 물 순환 변화를 분석하기 위해 구축한 HSPF 모형을 사용하였다(6단계). 이를 이용하여 현재 시나리오에 대한 대안의 효과를 분석하였고(7단계), 미래 기후변화 시나리오와 도시화 시나리오에 대해 각각 모의하였다(8단계).

가. 오전천 유역

Fig. 3은 오전천 출구지점에서 저수지 방류량 변경에 따른 과거 30년(1979-2008년)과 미래 기후변화(2011-2040) 시나리오(A1B, A2), 도시화 시나리오(C1, C2, C3)에 대해 분석한 유향곡선과 농도 지속곡선을 제시하였다. 또한 평가 항목별로 모든 시나리오에 대해 값과 변화율을 구체적으로 제시하면 Table 1과 같다.

고수량의 경우 도시화와 A1B, A2 시나리오에 대해 대안의 적용이 큰 영향이 없는 것으로 나타났다(평균 0.4 % 증가). 이는 용수공급을 위한 농업용 저수지로 저수용량이 매우 작기 때문이다.

반면 저수량의 경우 9개의 시나리오 평균 40.5 % 증

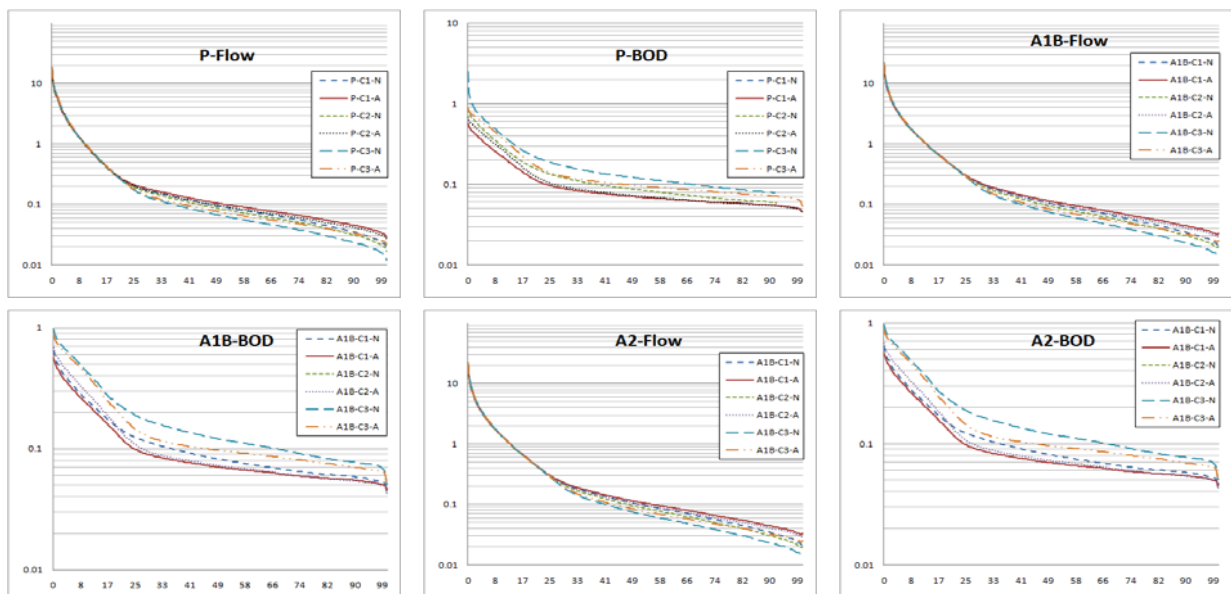


Fig. 3. Comparison of Flow and Concentration Duration Curves of All Scenarios (OJ)

Table 1. Results of Flow and BOD Concentration Duration Curves (OJ)

Criteria	Cases	C1			C2			C3		
		P	A1B	A2	P	A1B	A2	P	A1B	A2
Flow rate (cms)										
Q99	No Alt	0.022	0.023	0.023	0.020	0.020	0.022	0.014	0.015	0.020
	Alt	0.032	0.033	0.034	0.029	0.031	0.032	0.024	0.025	0.026
	Rate	44.6 %	43.2 %	51.5 %	50.5 %	49.3 %	41.9 %	70.4 %	63.2 %	31.0 %
Q95	No Alt	0.028	0.029	0.028	0.025	0.026	0.027	0.018	0.020	0.024
	Alt	0.038	0.040	0.040	0.035	0.037	0.037	0.028	0.029	0.030
	Rate	35.9 %	35.4 %	43.4 %	40.6 %	38.2 %	38.1 %	54.4 %	50.0 %	23.6 %
Q90	No Alt	0.034	0.035	0.033	0.030	0.031	0.032	0.022	0.024	0.029
	Alt	0.043	0.045	0.046	0.040	0.042	0.042	0.032	0.033	0.034
	Rate	28.7 %	27.1 %	37.6 %	32.4 %	32.1 %	30.3 %	42.9 %	42.3 %	16.2 %
Altered rate of low flow		36.4 %	35.2 %	44.2 %	41.2 %	39.9 %	36.8 %	55.9 %	51.8 %	23.6 %
Q10	No Alt	0.980	1.407	1.348	0.998	1.416	1.475	0.999	1.385	1.476
	Alt	0.990	1.418	1.359	1.008	1.425	1.485	1.009	1.395	1.486
	Rate	1.0 %	0.7 %	0.8 %	1.0 %	0.7 %	0.7 %	1.0 %	0.7 %	0.6 %
Q5	No Alt	2.241	2.896	2.889	2.293	2.936	3.231	2.360	3.003	3.301
	Alt	2.251	2.905	2.899	2.303	2.944	3.241	2.372	3.013	3.311
	Rate	0.5 %	0.3 %	0.3 %	0.4 %	0.3 %	0.3 %	0.5 %	0.3 %	0.3 %
Q1	No Alt	8.161	9.410	8.778	8.335	9.656	9.011	8.691	10.195	10.056
	Alt	8.170	9.421	8.788	8.348	9.661	9.021	8.703	10.203	10.067
	Rate	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.0 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %
Altered rate of high flow		0.5 %	0.4 %	0.4 %	0.3 %	0.5 %	0.4 %	0.5 %	0.4 %	0.3 %
Number of days*	No Alt	93.4	114.4	105.4	88.5	109.3	107.9	79.4	98.4	99.8
	Alt	103.9	125.7	125.1	97.7	119.0	118.3	83.8	103.7	104.2
	Rate	11.2 %	9.9 %	18.7 %	10.5 %	8.8 %	9.6 %	5.6 %	5.4 %	4.5 %
BOD concentration (mg/L)										
Q30	No Alt	3.85	3.84	3.71	4.19	4.17	4.02	5.89	5.79	5.54
	Alt	3.05	3.05	2.98	3.24	3.25	3.16	4.27	4.27	4.17
	Rate	-20.8 %	-20.6 %	-19.7 %	-22.6 %	-22.1 %	-21.3 %	-27.6 %	-26.3 %	-24.8 %
Q10	No Alt	8.52	8.90	8.87	10.33	10.99	11.02	14.37	15.42	15.26
	Alt	7.87	8.38	8.51	9.60	10.40	10.62	13.26	14.58	14.62
	Rate	-7.7 %	-5.8 %	-4.1 %	-7.1 %	-5.4 %	-3.7 %	-7.7 %	-5.4 %	-4.2 %
Q1	No Alt	18.21	18.75	18.25	22.01	22.58	22.06	28.74	29.35	28.83
	Alt	16.58	17.11	16.72	20.11	20.80	20.31	26.37	27.13	26.97
	Rate	-8.9 %	-8.7 %	-8.3 %	-8.6 %	-7.9 %	-7.9 %	-8.2 %	-7.6 %	-6.4 %
Altered rate of concentration		-12.5 %	-11.7 %	-10.7 %	-12.8 %	-11.8 %	-11.0 %	-14.5 %	-13.1 %	-11.8 %
Number of days**	No Alt	189.7	196.3	195.5	170.0	176.9	175.6	45.3	67.8	66.2
	Alt	247.3	246.7	252.2	231.6	234.0	236.9	110.8	111.9	114.4
	Rate	30.3 %	25.7 %	29.0 %	36.2 %	32.3 %	34.9 %	144.5 %	65.1 %	72.8 %

* Number of days to satisfy the instreamflow requirements

** Number of days to satisfy the target water quality

가을을 보였다. 특히 불투수면 비율이 높아질수록 현재 및 A1B 시나리오의 경우 저수량 증가 효과가 36.4 %, 41.2 %, 55.9 %와 35.2 %, 39.9 %, 51.8 %로 각각 나타났으며 A2 시나리오는 43.4 %, 38.1 %, 23.6 %로 오히려 감소되는 것으로 나타났다. 기후변화가 이루어지면 현재 계획된 대안의 효과는 현재 A2 시나리오를 제외하고는 모두 현재 기상조건보다 감소되는 것으로 나타났다.

목표 유지유량 만족일수는 대안의 적용으로 인해 모두 증가하지만 도시지역 비율이 높을수록 대안의 효율이 감소함을 알 수 있다. 또한 기후변화로 인해 대안의 효과 또한 조금씩 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 기후변화를 고려할 경우 현재 계획 중인 저수지 재개발은 저수용량과 방류량을 보다 크게 구성되어야 함을 알 수 있다.

BOD 농도의 경우 저수기 유량확보로 인해 출구점의 농도가 감소하는 것을 알 수 있다. 도시화가 진행될수록 저수지 재개발로 인한 농도 감소 효과는 -11.6 %, -12.1 %, -13.8 %로 더 커지며 A1B 시나리오의 경우 대안으로 인한 효과가 약간 줄어들지만 A2 시나리오의 경우 약간 증가하는 것으로 나타났다. 목표 농도 만족일수는 대안의 적용으로 모두 증가하는 것으로 나타났으며 도시화가 진행될수록 효과는 28.4 %, 49.1 %, 104.8 %로 더욱 커지는 것으로 나타났다. 기후변화 시나리오별로 살펴보면 현재상태의 경우 70.4 %로 가장 크게 나타났으며 A1B 시나리오의 경우 41.0 %, A2 시나리오의 경우 45.6 %로 나타났다. 따라서 저수량 측면과 마찬가지로 기후변화를 대비하여 현재의 효과를 유지하기 위해서는 현재보다 큰 저수용량의 저수지로 재

개발하여 방류량을 증가시키는 것이 필요하다.

나. 수암천 유역

Fig. 4는 수암천 출구지점에서 하수처리수 재이용에 따른 과거 30년(1979-2008년)과 미래 기후변화(2011-2040) 시나리오(A1B, A2), 도시화 시나리오(C1, C2)에 대해 분석한 유허곡선과 농도 지속곡선을 제시하였다. 또한 평가 항목별로 모든 시나리오에 대해 값과 변화율을 구체적으로 제시하면 Table 2와 같다.

고수량의 경우 도시화와 A1B, A2 시나리오에 대해 대안의 적용이 2.7 % 정도 증가시켜 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 즉, 대안의 치수효과가 거의 없음을 알 수 있다.

반면 저수량의 경우 6개의 시나리오 평균 304.1 % 증가율을 보였다. 특히 불투수면 비율이 높아질수록 현재 기상 시나리오 및 A1B 시나리오의 경우 저수량 증가 효과가 243.8 %에서 374.6 %로 증가하고 A2 시나리오에서는 199.4 %에서 274.3 %로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 기후변화의 경우 현재 조건에서 대안의 효과보다 기후변화가 이루어질 경우의 효과가 줄어들음을 알 수 있다. 따라서 기후변화를 고려할 경우 현재 계획 중인 하수처리수 재이용 대안은 안양하수처리장의 고도처리용량을 재이용수 이용량을 더 크게 계획하여야만 미래에서도 동일한 효과를 유지할 수 있다. 이러한 내용이 불가능하다면 수암천 유역에 소규모 하수처리장을 건설하여 현재 계획된 재이용수와 함께 유지유량으로 확보하는 방안을 계획할 수 있다.

목표 유지유량 만족일수는 하수처리수 재이용으로 인해 오전천 유역의 저수지 재개발보다 크게 증가하고

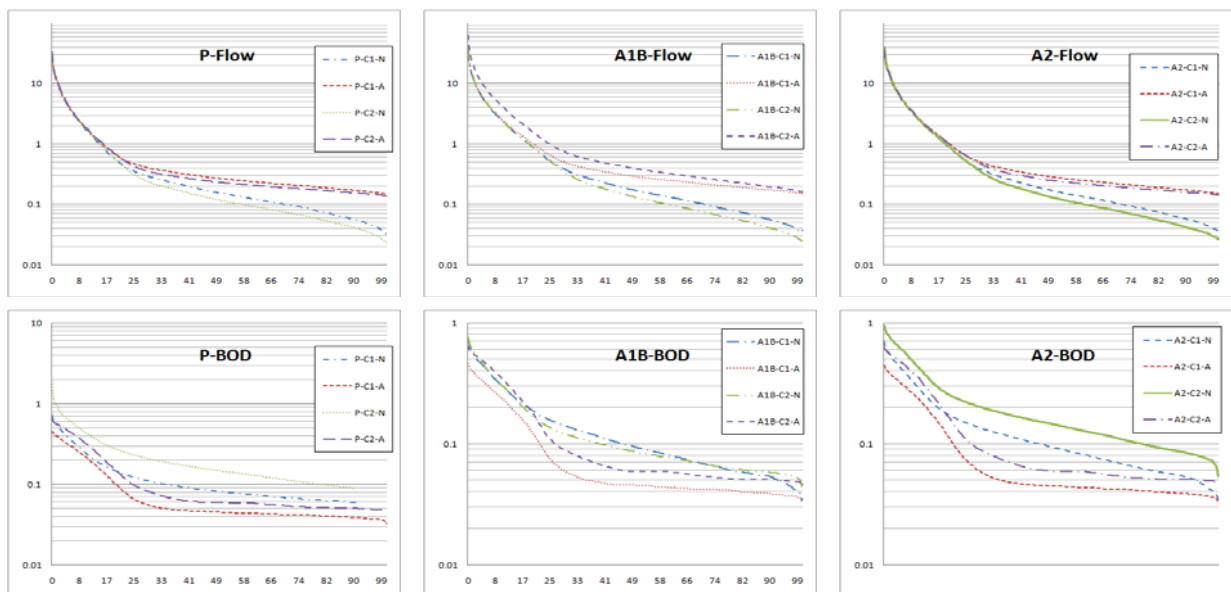


Fig. 4. Comparison of Flow and Concentration Duration Curves of All Scenarios (SA)

Table 2. Results of Flow and BOD Concentration Duration Curves (SA)

Criteria	Cases	C1			C2		
		P	A1B	A2	P	A1B	A2
Flow Rate (cms)							
Q99	No Alt	0.035	0.037	0.039	0.025	0.027	0.028
	Alt	0.151	0.153	0.155	0.141	0.142	0.144
	Rate	330.5 %	312.5 %	299.0 %	468.3 %	434.8 %	409.0 %
Q95	No Alt	0.046	0.048	0.049	0.033	0.035	0.035
	Alt	0.161	0.164	0.165	0.148	0.150	0.151
	Rate	254.1 %	243.8 %	236.8 %	356.4 %	333.5 %	326.7 %
Q90	No Alt	0.054	0.057	0.058	0.039	0.042	0.042
	Alt	0.170	0.173	0.174	0.155	0.158	0.158
	Rate	212.7 %	204.7 %	199.4 %	299.0 %	278.9 %	274.3 %
Altered rate of low flow		265.8 %	253.7 %	245.1 %	374.6 %	349.0 %	336.6 %
Q10	No Alt	1.800	2.558	2.669	1.825	2.527	2.652
	Alt	1.914	2.672	2.783	1.939	2.640	2.764
	Rate	6.3%	4.4%	4.3%	6.2%	4.5%	4.2%
Q5	No Alt	4.065	5.235	5.777	4.191	5.338	5.879
	Alt	4.178	5.352	5.895	4.307	5.460	5.997
	Rate	2.8%	2.2%	2.0%	2.8%	2.3%	2.0%
Q1	No Alt	14.839	17.183	17.928	15.546	18.231	18.893
	Alt	14.958	17.305	18.042	15.668	18.352	19.015
	Rate	0.8%	0.7%	0.6%	0.8%	0.7%	0.6%
Altered rate of high flow		3.3%	2.5%	2.3%	3.3%	2.5%	2.3%
Number of days*	No Alt	135.3	159.0	157.5	109.0	132.6	130.6
	Alt	226.7	255.8	252.6	218.8	244.4	241.6
	Rate	67.6 %	60.9 %	60.4 %	100.7 %	84.2 %	85.0 %
BOD concentration (mg/L)							
Q30	No Alt	4.64	5.01	4.91	7.04	7.49	7.36
	Alt	1.92	1.89	1.90	2.87	2.80	2.78
	Rate	-58.6 %	-62.2 %	-61.2 %	-59.2 %	-62.6 %	-62.3 %
Q10	No Alt	10.75	10.58	10.34	15.68	15.55	15.15
	Alt	7.93	8.03	7.94	11.72	11.74	11.61
	Rate	-26.3 %	-24.1 %	-23.2 %	-25.2 %	-24.5 %	-23.4 %
Q1	No Alt	46.30	21.69	21.89	40.45	30.53	30.80
	Alt	14.81	14.47	14.54	20.74	20.30	20.42
	Rate	-68.0 %	-33.3 %	-33.6%	-48.7 %	-33.5 %	-33.7 %
Altered rate of concentration		-50.9 %	-39.9 %	-39.3 %	-44.4 %	-40.2 %	-39.8 %
Number of days**	No Alt	160.2	147.3	146.2	32.3	25.4	28.3
	Alt	287.3	288.6	289.6	259.1	261.6	261.9
	Rate	79.4 %	95.9 %	98.1 %	701.3 %	931.1 %	825.3 %

* Number of days to satisfy the instreamflow requirements

** Number of days to satisfy the target water quality

있다. 도시화로 인해 대안의 효율은 더 커지지만 만족 일수는 오히려 줄어들고 있다. 기후변화는 강우의 증가로 인한 유출의 증가로 인해 만족일수를 증가시키는 효과도 있으며 대안의 적용으로 인해 만족일수는 이전보다 더 크게 나타남을 알 수 있다.

BOD 농도의 경우 하수처리수 재이용으로 인해 출구 점의 농도가 감소하는 것을 알 수 있다. 도시화가 진행될수록 대안의 농도 감소 효과는 현재 기상조건일 경우 -50.9 %에서 -44.4 %이지만 A1B, A2 시나리오에서는 변동이 크지 않았다. 즉 대안의 적용이 도시화로 인한 농도 증가를 둔화시켰다고 할 수 있다. 또한 기후변화로 인해 대안의 효과는 C1, C2 토지이용 시나리오 모두 감소하는 것으로 나타났다. C1 시나리오의 경우 현재 기상 시나리오에서 -50.9 %였는데 A1B 시나리오에 대해 -39.9 %, A2 시나리오에 대해 -39.3 %였고 C2 시나리오의 경우 현재 기상 시나리오에서 -44.4%에서 A1 시나리오에 대해 -40.2 %, A2 시나리오에 대해 -39.8 %를 보였다.

목표 농도 만족일수는 대안의 적용으로 모두 증가하는 것으로 나타났으며 도시화가 진행될수록 효과는 매우 크게 증가함을 알 수 있다. C1 토지이용 시나리오에 대해 대안 적용전 현재 기상 조건에서 160.2일, A1B 시나리오에서 147.3일, A2 시나리오에서 146.2일로 나타났으나 대안적용 후 세 경우 모두 약 287.3~289.6일 정도로 증가하였다. 또한 C2 토지이용 시나리오에서는 현재 기상조건에서 32.3일, A1B 시나리오에서 25.4일, A2 시나리오에서 28.3일 이었던 것이 대안 적용 후 259.1~261.9일로 크게 증가하였다. 따라서 만족일 수 측면에서 기후변화가 도시화가 발생할수록 상대적 효과는 더욱 커짐을 알 수 있다. 하지만 도시화가 발생할 경우 대안의 만족일수는 약간 줄어들기 때문에 대안을 설계할 때 이에 대한 검토가 필요하다.

5. 결 론

본 연구는 기후 및 도시화가 유역에 적용된 대안에 어떤 효과를 미치는지에 대해 분석해 보았다. 미래 시나리오에 대해 대안의 적용 효과를 살펴본 결과, 시나리오별 하천 유출량에 대한 대안 효과의 차이가 고수량에 비해 저수량, 수질오염 측면에서 크게 나타남을 알 수 있다. 기후변화가 대안들의 효과를 감소시키고 있으므로 과거 기상조건으로 설계했을 경우 대부분 30년 후에는 부족현상이 발생할 수 있다. 박경신 등(2009)의 연구결과와 같이 도시화는 저수량을 10 %~33.6 % 감소시키고, 고수량은 1.7 %~5.6 % 정도 증가시키며, 수질은 15.6 %~25.8 % 정도 악화시킨다고 제시하였으므로

적절한 물 순환 건전화 대안들이 이러한 현상을 크게 막아줄 수 있다. 즉 도시화가 진행될수록 악화된 상태로 인해 대안의 상대적 효율을 크게 증가한다. 목표 수질 만족일수는 도시화에 대해 매우 민감함을 알 수 있었다. 저수지의 저수용량에 따라 다르겠지만 안양천 유역의 경우 이수 측면에서 하천수 확보와 수질관리 측면에서 수질 개선 효과는 하수처리수 재이용이 상대적으로 큼을 알 수 있다.

미래의 기후 및 환경 변화는 불확실성이 크기 때문에 정확한 예측은 쉽지 않다. 그러나 지금의 추세대로라면 기온의 상승과 강수의 편중 및 도시화가 예상되므로 인간이 미래에 적응할 수 있도록 정량적인 예측을 통해 불확실성을 줄이는 것이 중요하다. 특히 이러한 적응을 위해 수립된 대안에 대한 효과를 미래의 불확실한 기후 및 환경변화를 반영하여 정량적으로 정확하게 예측하는 것이 적응 관리(adaptive management) 계획을 수립하는데 반드시 필요하다. 향후에는 다양한 GCM 모형과 RCM (regional circulation model) 모형을 고려하여 기후변화 모의모형과 시나리오에 대한 불확실성을 감소시키는 연구가 반드시 필요하다. 또 분석의 정확성을 높이기 위해 도시화에 대한 구체적인 계획을 수집하고 이를 모의하는 것이 필요하다. 특히 최근에는 도시지역에 녹지를 많이 조성하고 있으므로 불투수면적이 오히려 감소할 수 있는데 이에 대한 내용을 반영하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-3)의 서울대학교 공학연구소를 통한 연구비 지원(90 %)과 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반건설) 사업단의 연구비 지원(10 %)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- 박경신, 정은성, 김상욱, 이길성 (2009). “기후변화 및 도시화에 따른 유황곡선 및 BOD 농도지속곡선 변화.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제12호, pp. 1091-1102.
- 안소라, 이용준, 박근애, 김성준 (2008). “미래토지이용 및 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제2B호, pp. 215-224.
- 이길성, 정은성, 신문주, 김영오 (2006). “도시유역의 건전화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획: 2. 적용.”

- 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제39권, 제 11호, pp. 947-960.
- 이길성, 진락선, 이상호, 이정민 (2005). "PCSWMM을 이용한 건천화 방지를 위한 유지용수 공급 방안 (II) 모형의 적용." *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제25권, 제6B호, 437-441.
- Asselman, N.E., Middelkoop, H., and van Dijk, P.M. (2003). "The impact of changes in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine." *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 3225-3244.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L. Jr., Jobes, 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.
- Bronstert, A., Niehoff, D., and Burger, G. (2002). "Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modeling capabilities." *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 509-529.
- Center for Watershed Protection (2005) *Urban Subwatershed Restoration Manual Series: 1. An Integrated Framework to Restore Small Urban Watersheds Version 2.0*. Center for Watershed Protection, Ellicott City, MD.
- Chang, H. (2003). "Basin hydrologic response to changes in climate and land use: The Conestoga River basin, Pennsylvania." *Physical Geography*, Vol. 24, pp. 222-247.
- Cuo, L., Lettenmaier, D.P., Alberti, M., and Richey, J.E. (2009). "Effects of a century of land cover and climate change on the hydrology of the Puget Sound basin." *Hydrological Processes*, Vol. 23, pp. 907-933.
- Ewen, J., and Paarkin, G. (1996). Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. *Journal of Hydrology*, Vol. 175, pp. 583-594.
- Hejazi, M., and Moglen, G.E. (2008). "The effect of climate and land use change on flow duration in the Maryland Piedmont region." *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 4710-4722.
- Juckem, P.F., Hunt, R.J., Anderson, M.P., and Robertson, D.M. (2008). "Effects of climate and land management change on streamflow in the driftless area of Wisconsin." *Journal of Hydrology*, Vol. 355, pp. 123-130.
- Legesse, D., Vallet-Coulomb, C., and Gasse, F. (2003). "Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: Case study South Central Ethiopia." *Journal of Hydrology*, Vol. 275, pp. 63-85.
- Lee, K.S., and Chung, E.S. (2007). "Hydrological effects of climate change, groundwater withdrawal, and landuse in the small Korea watershed." *Hydrological Processes*, Vol. 21, pp. 3046-3056.
- Li, Z., Liu, W., Zhang, X., and Zheng, F. (2009). "Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China." *Journal of Hydrology* (on-line published).
- Ma, X., Xu, J., Luo, Y., Aggarwal, S.P., and Li, J. (2009). "Response of hydrological processes to land-cover and climate changes in Kejie watershed, south-west China." *Hydrological Processes*, Vol. 23, pp. 1179-1191.
- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., and Gustafsson, L. (2008). "The impact of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater." *Journal of Hydrology*, Vol. 350, pp. 114-125.
- Sulis, M., Marrocu, M., and Paniconi, C. (2009). "Conjunctive use of a hydrological model and a multicriteria decision support system for a case study on the Caia Catchment, Portugal." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 141-152.
- Wang, S., Kang, S., Zhang, L., and Li, F. (2008). "Modelling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China." *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 2502-2510.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W., Barrow, E.M. (2002). "SDSM - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts." *Environmental and Modelling Software*, Vol. 17, pp. 145-157.

논문번호: 09-112	접수: 2009.09.22
수정일자: 2009.10.12/10.13	심사완료: 2009.10.13