

기후변화를 고려한 소규모 하수처리장 건설에 대한 영향 분석

박경신 · 정은성^{*†} · 김상욱^{**} · 이길성^{***}

현대산업개발

^{*}한양대학교 공과대학

^{**}국회입법조사처 경제산업조사실 국토해양팀

^{***}서울대학교 건설환경공학부

Impact Analysis of Construction of Small Wastewater Treatment Plant Under Climate Change

Kyungshin Park · Eun-Sung Chung^{*†} · Sang-Ug Kim^{**} · Kil Seong Lee^{***}

Hyundai Development Corporation

^{*}College of Engineering, Hanyang University

^{**}Land, Transport and Maritime Affairs Team, National Assembly Research Service

^{***}Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

(Received 1 October 2009, Revised 20 January 2010, Accepted 22 January 2010)

Abstract

This study derived the effectiveness analysis results of construction of wastewater treatment plant under climate change scenarios. Canadian Global Coupled Model (CGCM3) was used and A1B and A2 of Special Report on Emission Scenario (SRES) were selected. Regional climate change data for this application were downscaled by using Statistical Downscaling Model (SDSM) and the flow and BOD concentration durations were obtained by using Hydrological Simulation Program - Fortran (HSPF). The criteria for low flow and water quality were chosen as Q_{99} , Q_{95} , Q_{90} and C_{30} , C_{10} , C_1 . The numbers of days to satisfy the instreamflow requirements and target BOD concentration were also added to the criteria for comparison. As a results, small wastewater treatment plant improved the water cycle due to the increase of low flow and the decrease of BOD concentration. But climate change affected the reduction of effectiveness significantly. Especially in case of construction of small waste water treatment plant in the upstream region, it is necessary to take climate change impact into consideration since it is usually related to the low flow and the water quality of the stream.

keywords : Climate change, Duration curve, Hydrological Simulation Program - Fortran (HSPF), Statistical Downscaling Model (SDSM), Waste water treatment plant

1. 서론

현재 여러 하천에서 하류에 건설된 대규모 하수처리장에서 방류되는 처리수를 고도처리한 후 상류로 이송하여 유량을 확보하고 있다. 대구시의 신천, 안양시의 학의천과 안양천 등 여러 지역에서 이미 설치되어 운영되고 있고 현재 계획 중인 지역도 많다. 더 나아가 상류 지역에도 고도처리 시설을 갖춘 소규모 하수처리장이 많은 지역에서 검토되고 있고 역곡천 상류의 역곡하수처리장과 같이 이미 건설되어 운영되는 곳도 있다. 도립천의 경우도 십여 년 전부터 하천의 건천화 방지를 위해 상류지역에 소규모 하수처리장 건설에 대한 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다. 하지만 한번 건설되면 수십년 동안 운영되어야 하는 하수처리장들이 도시계획, 인구 변화 등 사회적 변화요인들은 어느

정도 고려하고 있지만 기후변화에 대해서는 계획 수립시 전혀 반영하지 않고 있다. 즉 기존 하수처리장의 건설이 처리용량 기준으로 계획되었으나 향후에는 설계 용량보다 건설 후의 기후변화를 포함한 수십 년간의 물 순환 변화까지 반영하여 유지유량 확보와 수질개선을 위한 적절한 처리 용량과 방류수질의 결정, 고도처리 용량의 결정 및 고도처리 후 상류 유지유량 확보를 위한 이송 등의 문제를 포함하여야 한다.

최근 기후변화는 지구온난화와 맞물려 국내외에서 큰 이슈가 되고 있으며 20세기 이후 인류에게 가장 중요한 안전 중 하나가 되었다. 이에 국제사회 역시 지구온난화에 의한 영향에 큰 관심을 보이고 있으며 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)와 국제연합 환경프로그램(United Nations Environment Programme, UNEP)은 1988년 정부간 기후변화협회의(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)를 조직하였다. IPCC 보고(IPCC, 2002)에 의하면 지구온난화로 인해 지난 100여 년 동안 지

[†] To whom correspondence should be addressed.
ces825@hanyang.ac.kr

구의 평균기온이 약 0.6°C 정도 상승하였고, 우리나라 역시 1.1°C 정도 상승하였는데, 이 중 지구온난화에 의한 영향은 약 0.7°C인 것으로 추정하였다(Kim et al., 1997). 이는 온실효과를 발생시키는 이산화탄소(CO₂)의 농도가 산업혁명 이전의 280 ppm에서 2005년 379 ppm으로 뚜렷하게 증가함에 따른 결과이다. IPCC(2007)는 지금과 같은 추세라면 2050년 이전에 대기 중 이산화탄소 농도가 자연 수준의 두 배인 550 ppm까지 치솟아 21세기에는 기온이 1.1 ~ 6.4°C 까지 올라갈 것으로 예측하고 있다.

기후변화에 의한 평균기온 상승은 생태계는 물론 물순환에도 변화가 예상된다. 즉 현재 계획 중인 환경/수자원 관련 사업들 또한 이러한 변화를 반영하여 수립되어야 한다. 본 연구는 GCM(General Circulation Model) 모형 중 사용빈도가 높은 CGCM3(Canadian Global Coupled Model)를 이용하여 A1B와 A2 기후변화 시나리오를 모의하고 그 결과를 통계학적 축소화 모형인 SDSM(Statistical DownScaling Model; Wilby and Dawson, 2007) 모형을 이용하여 대상유역에 적합한 기후자료로 축소하였다. 또 미국 환경청(United States Environmental Protection Agency, U.S. EPA)에서 개발한 HSPF(Hydrological Simulation Program - Fortran; Bicknell et al., 2001) 모형을 이용하여 대상 유역(도림천)의 기후 변화에 따른 물순환을 모의하였고 하수처리장 건설이 이루어졌을 경우 효과가 어떻게 달라지는지 제시하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구절차

본 연구는 Fig. 1과 같이 크게 다섯 단계로 구성되어 있다. 첫 번째는 GCM 데이터의 수집이다. GCM 자료는 IPCC data distribution center(<http://www.ipcc-data.org>)에서 제공받을 수 있다. 본 연구에서 사용한 GCM으로는 IPCC 4차 보고서에 수록된 GCM 중 캐나다 CCCma(Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis)의 CGCM3(Canadian Global Coupled Model) 결과를 사용하였다. 두 번째 단계는 온실가스 배출 시나리오의 선택이다. IPCC의 온실가스 배출에 관한 특별 보고서(Special Report Emission Scenario, SRES; IPCC, 2001)에서 온실가스 배출 시나리오를 여러 개 제시하였다. 세 번째 단계는 GCM 자료의 축소화 과정이다. 수문모형에 적용하기에는 상대적으로 시·공간적 해상도가 큰 GCM의 결과 자료는 모형에 적용할 수 있도록 축소화 과정을 거쳐야 한다. 현재 IPCC 4차 보고서에서 제공하고 있는 GCM 자료의 해상도는 강우·유출 모형에 바로 적용하기에 크기 때문에 이를 대상유역의 해당 관측소의 경·위도에 맞춰 내삽(interpolation)하여 자료를 생성하였다. 내삽된 자료를 바탕으로 통계학적 축소기법을 이용해 일 단위의 시나리오를 생성하였다. 현재 많은 연구들이 월평균 자료를 이용하여 수문모의를 수행하고 있으나, 이미 국외에서는 월평균 자료를 일평균 자료로 축소화 하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에

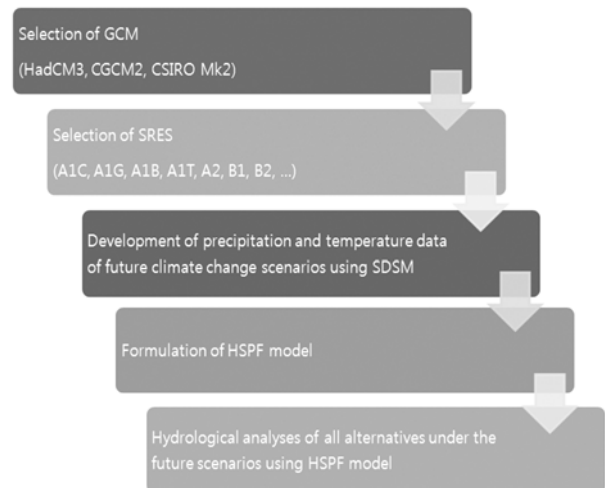


Fig. 1. Flow chart of this study.

서는 영국 환경청에서 개발하고 Khan 등(2006)이 축소화의 타당성을 검증한 SDSM(Statistical DownScaling Method) 모형을 이용하여 2040년까지의 일평균자료 시나리오를 생성하였다. 유역관리대안의 평가 목표연도는 2040년으로 1961년부터 2000년간 40년의 기상자료를 이용한 보정과 2001년부터 2008년 동안 8년의 검증용 자료를 생성하였다. 네 번째 단계는 연속유출 모의모형의 구축이다. 본 연구는 안양천 유역에 여러 차례 구축되어 적용성을 인정받은 HSPF 모형을 사용하였다(김경태 등, 2009; 이길성 등, 2007; 정은성 등, 2007). 다섯 번째 단계는 구축된 HSPF 모형을 이용하여 대상 유역에 제안된 대안들의 효과를 분석하는 것이다. 내삽과 통계학적 방법으로 생성된 기후변화 시나리오를 이용하여 HSPF 모형으로 시나리오에 따른 물 및 오염물질의 순환을 모의하였다. 모의된 결과를 바탕으로 도림천 유역에 하수처리장을 건설하는 사업에 대한 효과를 분석하였다. 더 나아가 비교 분석을 위해 현재 일부 운영중인 지하철 역사에서 발생하는 지하수를 하천으로 방류하는 대안을 함께 분석하여 제시하였다.

2.2. HSPF 모형

HSPF 모형은 유역에서 발생하는 유출수의 양과 질을 모의하기 위해 설계된 종합적(comprehensive), 개념적(conceptual), 연속적(continuous) 유역 모의 모형으로 1966년 개발된 스탠포드 유역 모형(stanford watershed model)에 기원을 두고 있다. 현재의 HSPF 모형은 1980년 미국 환경청에서 개발한 것으로 기존의 HSP(Hydrocomp Simulation Programming), ARM(Agricultural Runoff Management), NPS(Non-Point Source), SERATRA(SEDiment and RADionuclides TRANsport) 모형들에서 수행되는 다양한 모의 모듈(module)을 새롭게 수정하여 보완한 프로그램이다.

HSPF 모형의 구동을 위하여 필요한 입력자료는 기상자료, DEM, 토지이용도가 있으며 이 요소들을 다음과 같이 HSPF 모형에 구축하였다. 기상자료는 안양천 유역에 인접한 수원기상대와 서울기상대 자료를 이용하였으며 이 중

강수량은 안양천 유역종합치수계획(현대 Eng., 2005)에서 작성된 Thiessen 망의 면적비를 사용하여 강수량의 공간적 분포를 고려하였다. 수원기상대와 서울기상대에서 수집한 1993년부터 2005년까지의 시간별 강수량, 증발량, 기온, 풍속, 일사량, 이슬점 온도, 운량 자료를 HSPF 모형의 입력과 출력을 위해 개발된 WDMUtil을 이용하여 모형에 구축하였다.

DEM을 HSPF 모형에 구축하기 위해 건설교통부 국토지리정보원에서 가장 최근에 발행한 1999년도 1/25,000 수치지형도와 ArcView GIS Tool을 이용하였다. DEM의 격자크기는 모의시간의 효율성과 모의결과의 정확성을 고려하여 30 m × 30 m를 선택하였다(조효섭 등, 2003; Chaubey et al., 2005). 또한 토지이용도를 구축하기 위하여 국토지리정보원에서 가장 최근에 발행한 1999년도 1/25,000 수치도지 이용현황도와 ArcView GIS Tool을 이용하였다.

HSPF 모형의 검보정은 이길성 등(2007)에서 수행한 결과를 이용하였다. 이길성 등(2007)에서는 2005년 기상자료를 사용하여 안양천 출구점(양화교)을 기준으로 수문 매개변수는 총유출량(total flow)과 첨두유량(peak flow)을, 수질 매개변수는 BOD 총부하량(total load)과 첨두농도(peak concentration)에 대하여 민감도 분석을 각각 실시하였다. 그 결과 유출에 1% 이상 영향을 주는 LZSN(lower zone nominal storage, mm), UZSN(upper zone nominal storage, mm), INFILT(index to the infiltration capacity of the soil, mm/hr), INTFWinterflow inflow parameter), IRCIRC(interflow recession parameter, 1/day), AGWRC(basic groundwater recession rate, 1/day)와 총부하량과 첨두농도에 1% 이상 영향을 주는 KODSET(rate of BOD setting, m/hr), TCBOD(temperature correction coefficient for BOD decay), KBOD20(unit BOD decay rate 20 degrees C, 1/hr)을 보정에 사용할 매개변수로 선정하였다. 본 연구에서는 2005년 기상자료를 사용하여 민감도 분석을 수행하였는데 미래 기상자료를 포함한 다른 기간의 자료를 사용해도 분석 결과는 거의 차이가 없다. 생성한 미래 기상자료를 사용하지 않은 이유는 실측값이 존재하지 않아서 검·보정이 어렵기 때문이다. 본 연구에서는 대상유역을 기상자료와 물리적 특성을 고려하여 상류 유역, 중류 유역, 목감천 유역, 도림천 유역으로 나누어 보정 및 검증을 각각 실시하였다.

2.3. SDSM 모형

영국과 웨일즈 환경청의 지원을 받아 꾸준히 연구되고 있는 SDSM 모형은 다중회귀분석(multi-regression analysis)을 이용하여 미래의 기상자료를 생성하게 된다. 원하는 지점의 미래 일단위 기상자료를 얻기 위해 SDSM 모형에 필요한 입력자료는, 1961년부터 2000년까지의 예측하고자 하는 지점의 관측 자료와 미국의 국가 환경 예측센터(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)에서 제공하는 관측값을 토대로 작성된 설명변수, GCM을 기반으로 작성된 예측변수가 있다. SDSM 모형의 다중회귀분석은 예측하고자 하는 기상자료가 종속변수가 되고 NCEP의 자료는 보

정을 위한 설명변수가 된다. 모형의 보정으로부터 얻은 매개변수를 이용하여 GCM을 기반으로 작성된 예측변수에 의해 기상자료를 생성하게 된다.

SDSM 모형의 장점은 웹사이트(<https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/software.html>)를 통해 무상으로 배포되고 있다는 점과 종속변수의 적용범위가 크다는 점, 자료를 앙상블로 생성하여 불확실성에 대한 분석이 가능하다는 점 등이 있다. 또한 지역의 기후특성을 매우 잘 반영할 수 있으며 사용이 매우 용이하다는 것이 장점이다. 그러나 GCM의 자체적인 오류가 그대로 반영될 수 있고 IPCC에서 월단위의 자료로 배포된 GCM의 결과를 그대로 사용할 수 없으며 일단위로 변환된 GCM의 결과가 반영된 예측변수를 이용하여야 한다. 주된 기능은 변수들간의 상관분석과 매개변수의 추정 및 미래자료의 생성을 할 수 있으며 잔차의 도시, 100개까지 지원되는 앙상블 자료군을 비롯해 간단한 통계분석이 가능하다(박경신 등, 2009).

2.4. 대상유역 및 적용 대안

도림천은 관악산의 북사면인 관악구 신림동에서 발원하여 북서쪽으로 유로가 형성되어 도심지를 통과하는 하천이다. 지류로는 봉천천과 대방천이 있으며 영등포구 문래동 5가에서 안양천과 합류한다. 도림천 유역의 위치는 동경 126° 35' ~ 126° 58', 북위 37° 25' ~ 37° 30'에 해당하는 지역이며, 서울시 구로구, 금천구, 영등포구, 동작구, 관악구 등 5개 행정구역으로 구성되어 있다. 유역면적 40.96 km², 유로연장 14.20 km, 유역평균 폭 2.95 km의 배수구역이다. 유역의 형상은 수지상을 이루고 있으며 본류인 도림천은 전구간 개수가 완료되었으며, 하폭은 21 m에서 34 m, 하상경사는 1/88~1/1,163, 하상구성 재료는 불용토를 포함한 실트질 모래 및 자갈모래 층으로 구성되어 있다.

본 연구에서 적용한 대안들은 정은성 등(2008)에서 안양천 유역에 제시한 대안 중 Fig. 1과 Table 1과 같이 도림천에 계획된 대안인 1) 도림천 유역 내의 지하철역에서 발생하는 용출수의 활용(Alt1), 2) 서울대학교 정문 앞 공원녹지에 일 19,000 m³의 규모를 갖는 소규모 하수처리장을 건설하였을 경우(Alt2), 3) 1안과 2안을 동시에 고려했을 경우(Alt3)의 기후변화와 토지이용변화에 따른 하천 유량과 BOD 농도의 변화를 살펴보았다. 본 연구는 하수처리장의 건설로 인해 유역에 미치는 물순환에 대한 영향이 기후변화로 인해 어떻게 달라지는지 알아보기 위해 1안과 3안을 추가하여 비교, 검토하였다. 대안 1은 하천수 확보측면보다 지하철 역사 유지관리를 위해 이미 실시된 대안이며 발생하는 양도 매우 불규칙적이어서 하수처리장 건설 대안과 비교하기 위해 고려되었다. 지하철역에서 발생하는 용출수는 시점에 따라 그 양이 매우 달라지지만 평균값은 도림천역 437 m³/일, 대림역, 4,237 m³/일, 양평역 8,471 m³/일, 영등포역 4,558 m³/일로 측정된 바 있으므로(서울특별시, 1998), 이를 활용하였다. 지하철 용출수의 BOD 농도는 1 mg/L로 가정하였고 하수처리장의 방류량과 방류수질은 12,540 m³/일과 5 mg/L를 적용하였다.

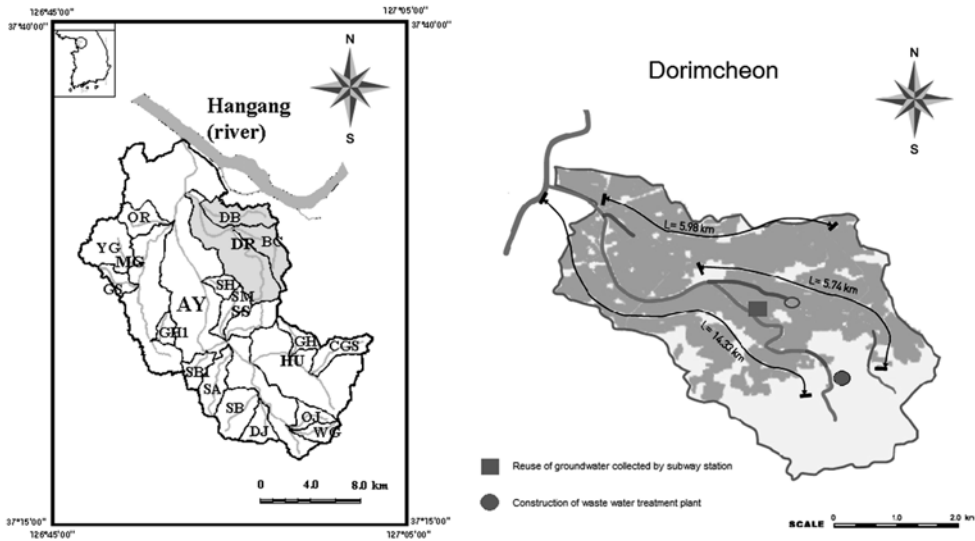


Fig. 2. Map of the study watershed.

Table 1. Applied alternatives in this study

Code for classification	Alternatives	Quantity (cms)	Quality (mg/L)
Alt 1	Use of groundwater collected by subway station	0.205	1.0
Alt 2	Reuse of treated wastewater	0.145	5.0
Alt 3	AL6-1 & AL6-3	0.350	6.0

3. 결과 및 고찰

3.1. 기후변화 시나리오 생성

기후변화가 하천 유황에 미치는 영향을 파악하기 위해서 정 부간 기후변화 협의회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 제공하고 있는 GCM 중 CGCM3 (Canadian Global Coupled Model)의 결과를 이용하여 수문 모형에 적용시켰다. 온실가스 배출시나리오는 IPCC의 온실 가스 배출에 관한 특별 보고서(Special Report on Emission Scenario, SRES)의 시나리오 중 A1B와 A2 시나리오를 선택하였다. A1B는 최근 IPCC 4차 연간보고서에서 제시되어 있는데 현실에 가장 잘 부합되는 시나리오로 그 적용사례가 늘고 있다. 2100년까지 CO₂가 720 ppm에 도달할 것으로 예상하며 에너지 공급원이 균형을 이루게 될 것으로 가정한다(안소라 등, 2009). A2 시나리오는 CO₂ 배출농도가 급격히 증가하여 2100년에는 820 ppm에 이르는 배출시나리오로 온실가스가 급격히 증가할 경우 하천의 유황에 미치는 영향을 평가하는 것은 안정성 측면에서 의미가 있는 것으로 판단되어 선정하였다(배덕효 등, 2007).

본 연구에서 사용된 GCM 모형인 CGCM3의 격자는 약 350 km × 350 km의 크기를 갖는다. NCEP의 자료 역시 같은 크기의 해상도를 가지고 있기 때문에 보다 합리적인 분석을 위하여 NCEP와 CGCM3의 예측변수를 서울관측소의 위치로 보간하였다. 이 과정에서 간단한 내삽법인 겹선형보

간법을 이용하였다. NCEP와 CGCM3의 격자점 위치와 서울관측소의 위치는 Fig. 3과 같다.

기후변화 시나리오를 HSPF 모형에 적용시키기 위하여 다중회귀분석을 기반으로 한 통계학적 축소기법 모형인 SDSM 모형을 이용하여 월단위 자료로 제공되고 있는 GCM 결과 값을 일단위 자료로 축소화하였다. 기후변화 시나리오를 작성한 대상 지점은 서울관측소로 2001년부터 2100년까지의

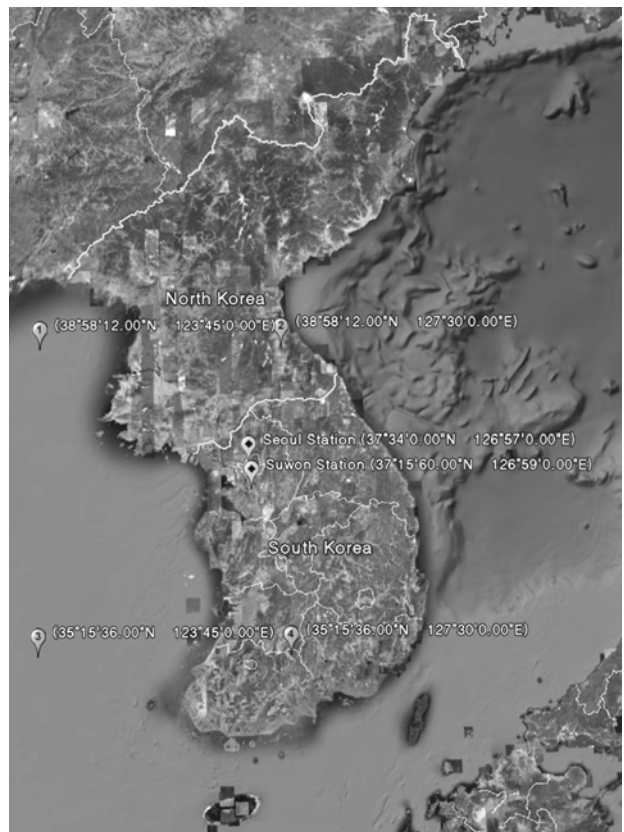


Fig. 3. Location of used grid point of NCEP, CGCM3, Seoul station.

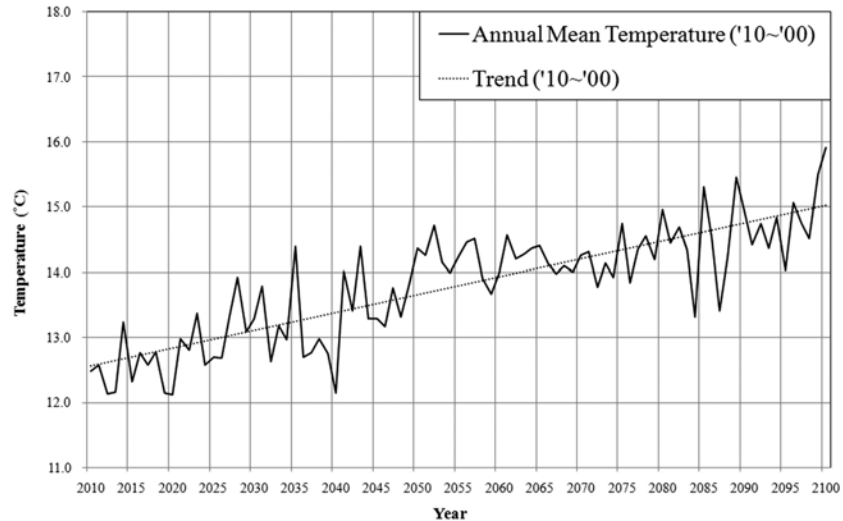
Table 2. Result of Mann-Kendall test

Station	Present (1961~2000)		Future (2011~2100)			
	Air temperature	Precipitation	Air temperature		Precipitation	
Scenarios	Present (1961~2000)		A1B	A2	A1B	A2
S	4.978 E+6	-6.230 E+5	26148200	41115776	5134131	7655988
$V(S)$	5.988 E+11	3.922 E+11	4.080 E+12	4.080 E+12	3.792 E+12	2.803 E+12
u_c	6.433	-0.995	12.946	20.356	2.637	4.573
p -value	1.250 E-10	0.320	2.220 E-16	2.220 E-16	0.002	4.820 E-16

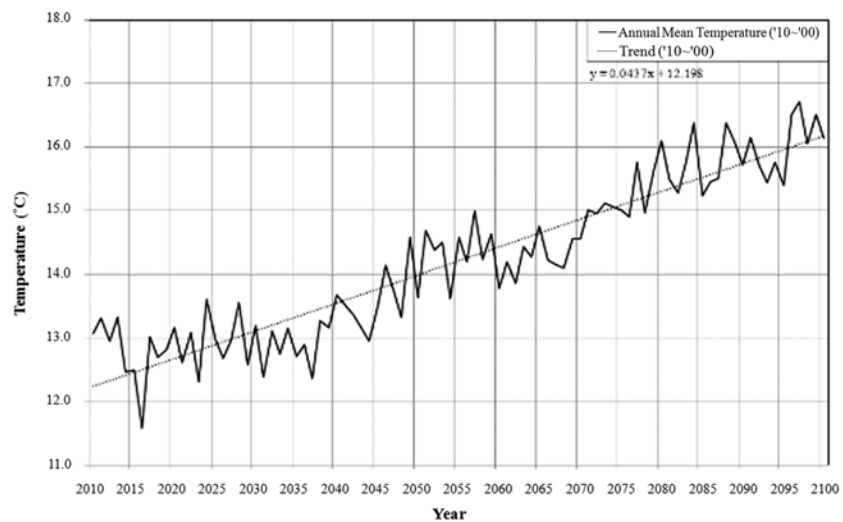
강수량과 기온 자료를 생성하였다. Mann-Kendall 검정을 통하여 Table 2와 같이 과거와 미래 모두 경향성이 있음을 확인하였다. 서울관측소는 대상기간동안 A1B 시나리오에서 연평균 기온이 약 1.5°C 증가한 13.7°C를 나타냈고 A2 시나리오에서는 약 1.9°C 상승한 14.1°C로 나타났다. 강수량의 경우 과거의 평균 연총강수량이 1,401.3 mm에 비해 A1B 시나리오는 약 500 mm가 증가한 1,896.9 mm이며, A2 시나리오는 약 630 mm가 증가한 2,029.5 mm로 나타

났다. 각 시나리오별로 서울관측소의 온도와 강수량 그래프는 Fig. 4, 5와 같다.

‘고성장 사회’ 시나리오인 A1B의 시나리오에 비해 ‘다원화 사회’를 가정하고 있는 A2 시나리오에서 더 큰 기온의 변동을 살펴볼 수 있었다. A2 시나리오는 개별적인 국가나 민족의 발전이 독립적으로 이루어진다는 가정을 갖는 시나리오이다. 따라서 환경 문제는 지역적으로만 해결하는 노력을 기울이고, 전 지구적인 문제에 대한 노력은 기울이지

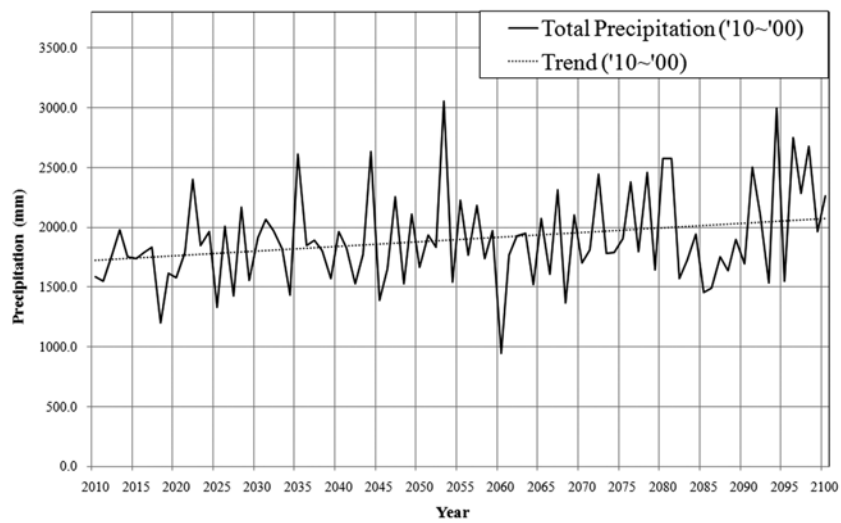


(a) A1B

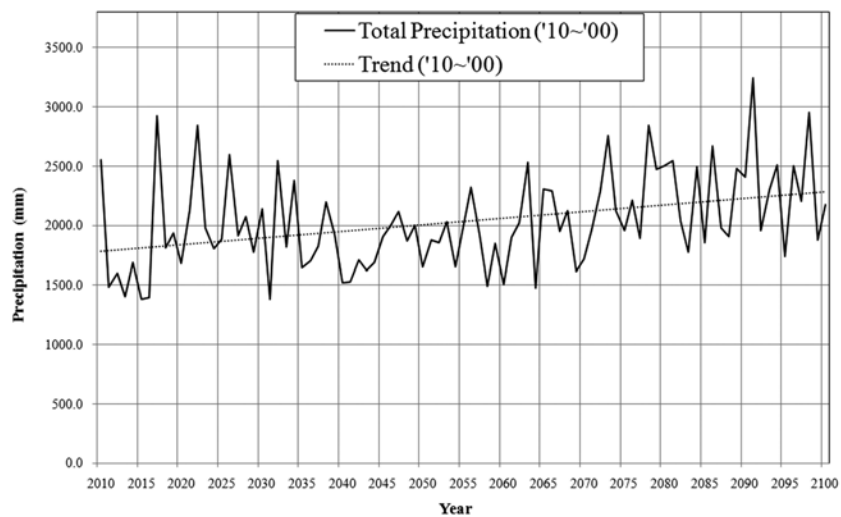


(b) A2

Fig. 4. Predicted annual mean temperature at Seoul station.



(a) A1B



(b) A2

Fig. 5. Predicted total precipitation at Seoul station.

않는 가정이 반영되어 있기 때문에, 기후변화의 양상이 A1B 시나리오에 비해 더 크게 나타나게 된다.

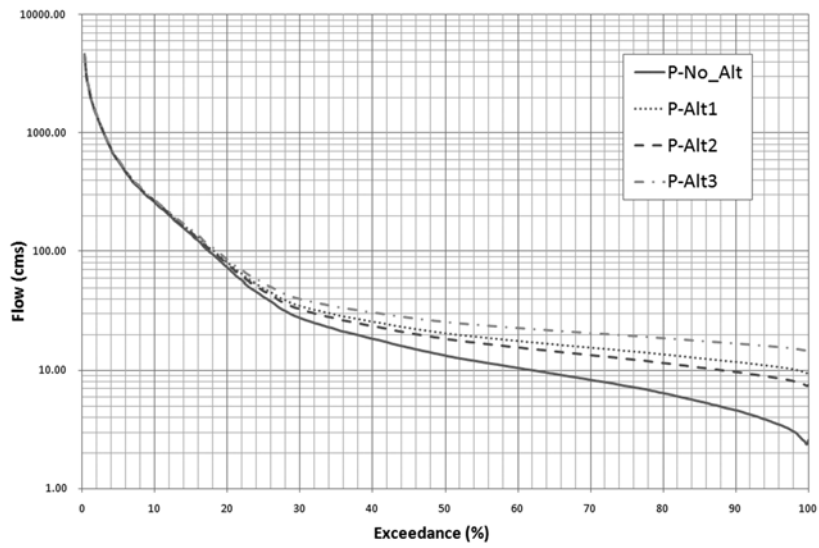
3.2. 효과 분석

본 연구에서는 김경태 등(2009)이 안양천 유역에 구축한 HSPF 모형을 사용하였다. 효과를 비교하기 위해 사용된 목표유지유량과 목표수질은 이길성 등(2006)에 제시된 값을 이용하였다. 목표유지유량은 수문학적 갈수량과 PHAMSIM (US Geological Survey, 2001) 모형을 이용한 생태학적 유지유량을 고려하여 월별로 0.277 cms (1, 2, 3, 11, 12월), 1.1 cms (4, 9, 10월), 0.4 cms (5, 6월), 1.05 cms (7, 8월)로 산정되었고 목표 수질은 이미 달성되었다고 판단되는 환경부 기준(5등급) 대신 지자체 별로 수립한 내용을 종합하여 BOD 5 mg/L이하로 수립하였다.

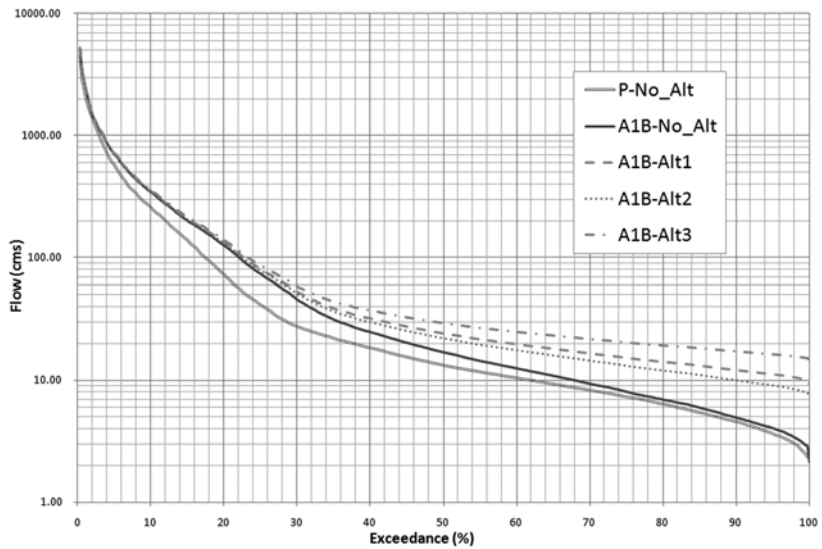
Hejazi and Moglen(2008)은 기후변화와 도시화가 물 순환에 미치는 영향을 분석하기 위해 갈수량(low flow)의 변화에 대해 99%, 95%, 90%의 유황(flow duration)을, 고수

량(high flow)의 변화에 대해 10%, 5%, 1%의 유황을 이용하였다. 김주철 등(2009)은 유역관리를 위한 평가기준으로 유황곡선의 거동특성을 제안한 바 있고 한수희 등(2007)도 유역관리를 위해 부하량 유황곡선을 사용한 바 있다. 따라서 본 연구에서도 대안의 물 순환 측면에서 효과분석을 위해 유황곡선(flow duration curve)과 BOD 농도지속곡선(concentration duration curve)을 이용하였다. 이수 측면에서 갈수량인, 99%, 95%, 90% 유황(Q_{99} , Q_{95} , Q_{90})과 목표유지유량 만족일수를, 수질관리를 위해 농도 지속곡선에서 30%, 10%, 1%의 농도값(C_{30} , C_{10} , C_1)과 목표수질 만족일수를 대안의 평가기준으로 사용하였다.

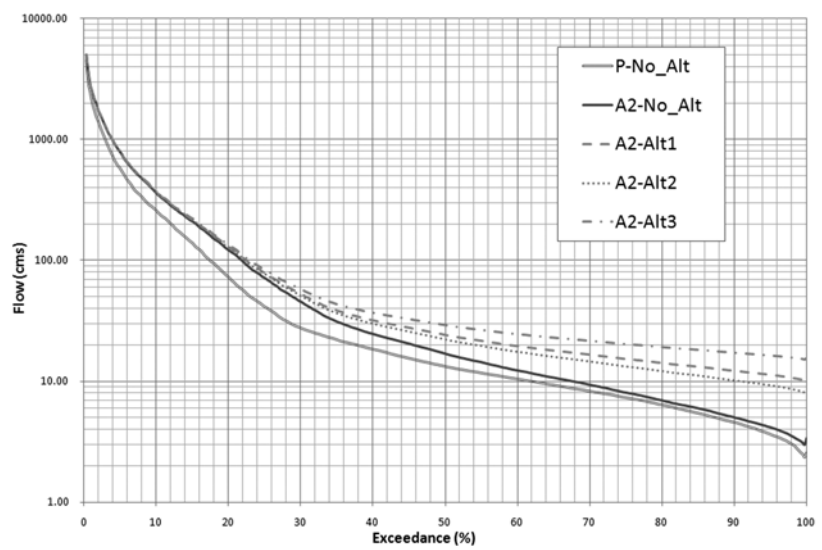
각 시나리오별, 대안별로 HSPF 모형을 이용하여 분석하였다. Fig. 6은 도림천 출구지점에서 대안 1, 2, 3의 과거 30년(1979~2008년)과 미래 기후변화(2011~2040년) 시나리오(A1B, A2)에 대해 분석한 유황곡선과 농도 지속곡선을 제시하였다. 또한 평가 항목별로 모든 시나리오에 대해 값과 변화율을 구체적으로 제시하면 Table 3, 4와 같다.



(a) Present

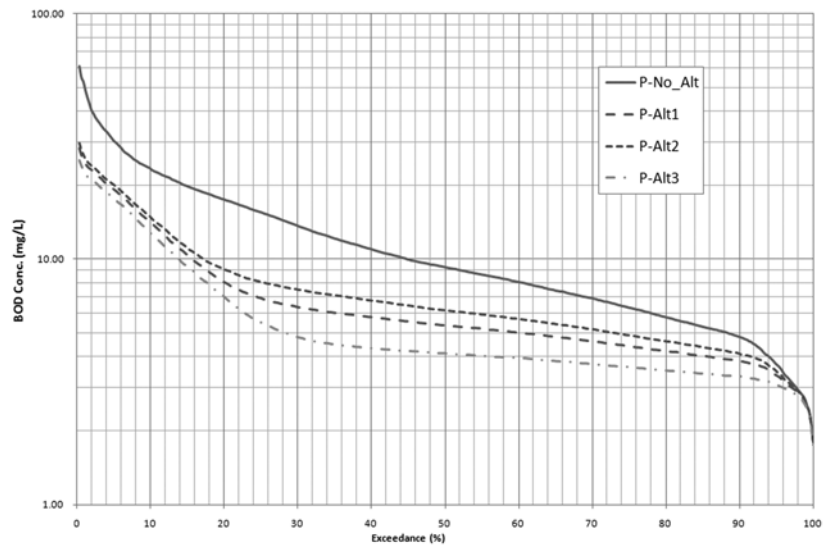


(b) A1B

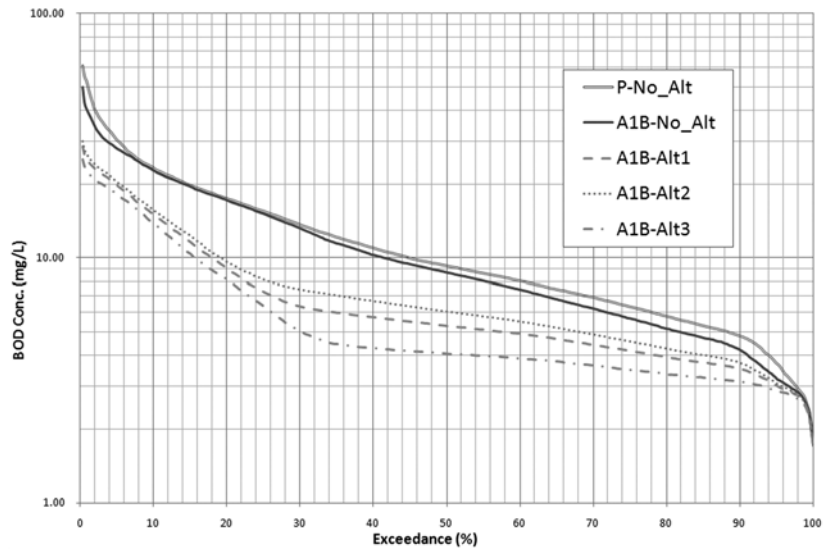


(c) A2

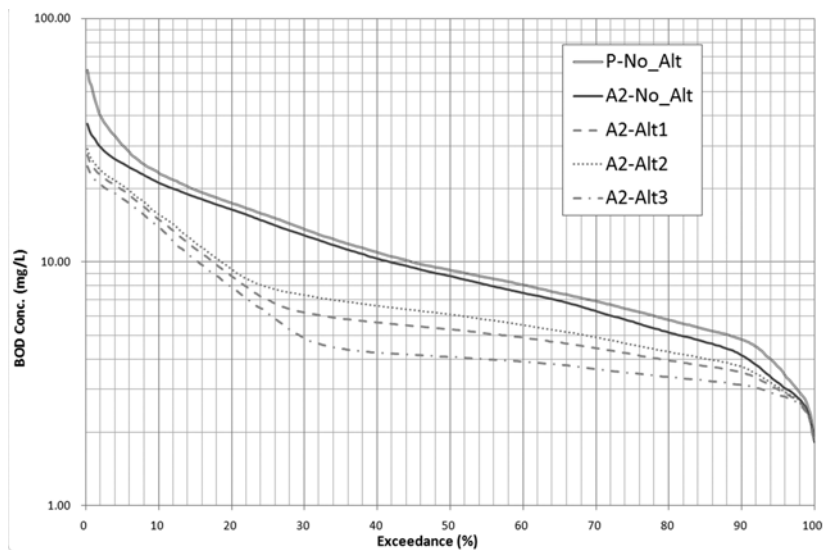
Fig. 6. Flow duration curves of all alternatives under climate change scenarios.



(a) Present



(b) A1B



(c) A2

Fig. 7. BOD pollutant duration curves of all alternatives under climate change scenarios.

Table 3. Summary of flow duration changes and numbers of days required satisfying target quantity

Criteria	Scenario	Values (cms)			Ratio			
		P	A1B	A2	P	A1B	A2	Average
Q10	No Alt	0.07	0.09	0.09				
	Alt1	0.28	0.29	0.29	279.0%	234.2%	222.8%	245.3%
	Alt2	0.22	0.23	0.23	196.2%	165.1%	156.7%	172.7%
	Alt3	0.42	0.43	0.44	477.8%	401.9%	381.3%	420.3%
Q5	No Alt	0.10	0.11	0.12				
	Alt1	0.31	0.32	0.32	198.3%	177.1%	171.4%	182.3%
	Alt2	0.25	0.26	0.26	139.7%	125.1%	120.4%	128.4%
	Alt3	0.45	0.46	0.47	339.9%	303.2%	293.6%	312.2%
Q1	No Alt	0.13	0.14	0.14				
	Alt1	0.33	0.34	0.35	157.3%	146.2%	143.2%	148.9%
	Alt2	0.27	0.28	0.29	110.9%	103.0%	101.1%	105.0%
	Alt3	0.48	0.49	0.49	269.5%	250.1%	244.8%	254.8%
Number of days required satisfying target quantity	No Alt	138.6	69.4	67.4				
	Alt1	254.0	115.9	116.0	83.3%	67.1%	72.0%	74.1%
	Alt2	219.0	101.2	101.0	58.0%	45.9%	49.8%	51.3%
	Alt3	278.1	122.3	122.2	100.7%	76.3%	81.3%	86.1%

Table 4. Summary of BOD concentration duration changes and numbers of days required satisfying target quality

Criteria	Scenario	Values (mg/L)			Ratio			
		P	A1B	A2	P	A1B	A2	Average
C30	No Alt	23.17	22.62	21.08				
	Alt1	13.91	14.89	14.96	-40.0%	-34.2%	-29.0%	-34.4%
	Alt2	14.70	15.59	15.67	-36.6%	-31.1%	-25.7%	-31.1%
	Alt3	12.60	13.72	13.89	-45.6%	-39.3%	-34.1%	-39.7%
C10	No Alt	23.17	22.62	21.08				
	Alt1	13.91	14.89	14.96	-40.0%	-34.2%	-29.0%	-34.4%
	Alt2	14.70	15.59	15.67	-36.6%	-31.1%	-25.7%	-31.1%
	Alt3	12.60	13.72	13.89	-45.6%	-39.3%	-34.1%	-39.7%
C1	No Alt	49.00	38.91	32.47				
	Alt1	24.49	24.58	24.51	-50.0%	-36.8%	-24.5%	-37.1%
	Alt2	25.63	25.93	25.71	-47.7%	-33.3%	-20.8%	-34.0%
	Alt3	22.34	22.26	22.23	-54.4%	-42.8%	-31.5%	-42.9%
Number of days required satisfying target quality	No Alt	46.7	28.7	28.8	274.6%	153.2%	149.3%	
	Alt1	153.3	65.6	63.8	228.2%	128.4%	121.3%	159.3%
	Alt2	102.8	47.7	46.6	120.1%	66.1%	61.7%	82.7%
	Alt3	268.8	104.9	105.2	475.5%	265.1%	264.9%	335.2%

저수량의 경우 과거 30년 시나리오의 경우 세 개의 대안 평균이 241.0% 증가하고, A1B 시나리오의 경우 211.8%, A2 시나리오의 경우 203.9% 증가하는 것으로 나타났다. 즉 기후변화로 인해 하수처리장 방류로 인한 건기 유출량의 증가가 29.2%, 37.1% 줄어드는 것으로 나타났다. 대안 별로는 대안 1이 현재 시나리오에서 211.5%, A1B 시나리오에서 185.8%, A2 시나리오에서 179.1%로 나타났고 대안 2는 현재 시나리오에서 148.9%, A1B에서 131.1%, A2 시나리오에서 126%로 나타났으며 대안 3은 현재 시나리오에서 362.4%, A1B 시나리오에서 318.4%, A2 시나리오에서 306.6%로 나타났다. 즉 A1B 시나리오의 경우 현재 조건보다 효과가 12.0% 감소하고 A2 시나리오의 경우 15.3% 감소하는 것으로 나타났다. 상대적으로 대안 2의 효과가 대안 1보다 작으며, 대안간 감소폭의 차이는 크지 않은 것

로 나타났다.

목표 유지유량 만족일수는 대안의 적용으로 인해 모두 증가하지만 기후변화가 발생하는 시나리오의 경우 대안의 효율이 현재의 기상조건에서 대안의 효율보다 크게 작음을 알 수 있다. 대안 1은 A1B와 A2 시나리오 평균 138.1일 줄어들었고 대안 2는 117.8일, 대안 3은 155.8일 줄어들었다. 대안들 모두 크게 감소하는 것으로 나타났다. 기후변화가 유량 자체 변화에 미치는 영향보다 유지유량 만족일수 측면에 미치는 악영향이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 즉, 기후변화로 인해 인간이 느끼는 피해는 자연현상보다 훨씬 클 것으로 예상된다.

BOD 농도의 경우 하천의 유량증가로 인해 출구점의 농도가 감소하는 것을 알 수 있다. 현재 기상조건인 경우 대안 1에 대한 농도 감소 효과는 43.3%, A1B 시나리오의 경

우 35.1%, A2 시나리오의 경우 27.5%이고, 대안 2의 경우 현재 기상조건에서 40.3%, A1B 시나리오의 경우 31.8%, A2 시나리오의 경우 24.1% 감소하는 것으로 나타났으며 대안 3의 경우 현재 기상조건에서 48.5%, A1B 시나리오의 경우 40.5%, A2 시나리오의 경우 33.2% 감소하는 것으로 나타났다. 즉 대안들의 효과가 A1B 시나리오의 경우 현재 기상조건보다 18.9% 감소폭이 작고, A2 시나리오의 경우 36.1% 감소폭이 줄어드는 것으로 나타났다. 즉 시나리오 특성대로 A2 시나리오에서 감소폭이 크게 나타났다. 특히 하수처리장 건설에 대한 효과 감소는 현재 기상조건에서 40.3%, A1B 시나리오의 경우 31.8%, A2 시나리오의 경우 24.0% 감소하는 것으로 나타났다.

목표 수질 만족일수 역시 대안의 적용으로 인해 모두 어느 정도 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 기후변화가 발생하는 시나리오의 경우 대안의 효율이 현재의 기상조건에서의 대안 효율보다 크게 작음을 알 수 있다. 대안 1의 경우 현재 기상조건에서 평균 만족일수 153.3일에서 65.6일(A1B), 63.8일(A2)로 감소하였고 대안 2의 경우 102.8일에서 47.7일(A2B), 46.6일(A2)로 감소하였으며 대안 3의 경우 268.8일에서 104.9일(A1B), 105.2일(A2)로 감소하였다. 즉 목표유지유량 측면과 마찬가지로 기후변화가 인간의 이용 측면에서 보다 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 대안 별로 평균 57.8%, 54.1%, 60.9% 감소하는 것으로 나타나 대안간, 시나리오별로 크게 차이가 나지 않음을 확인했다.

4. 결론

본 연구는 소규모 하수처리장 건설로 인한 물순환의 변화가 기후변화로 인해 어떻게 변화하는지 알아보기 위해 GCM 모형중 하나인 CGCM3의 A1B, A2 시나리오 자료와 연속유출모의가 가능한 HSPF 모형을 이용하였다. 분석에 사용된 기준으로 이수 측면에서 유허곡선의 Q₁₀, Q₅, Q₁과 목표유지유량 만족일수를 이용하였고 수질관리 측면에서 BOD 농도 지속곡선의 C₃₀, C₁₀, C₁과 목표수질 만족일수를 이용하였다. CGCM3의 자료를 대상유역에 적용하기 위해서 SDSM 모형을 이용하여 축소화하였다. 모의결과 소규모 하수처리장 건설로 인해 건기 하천 유량은 크게 증가하지만 기후변화를 고려할 경우 그 효과는 약 12.0% (A1B), 15.3%(A2) 정도 감소하는 것으로 나타났다. 목표유지유량 만족일수는 감소폭이 매우 컸으며 소규모 하수처리장의 경우 평균 117.8일이나 감소하였다. BOD 농도의 경우 대안들의 적용으로 인해 24.1~48.5% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 기후변화로 인해 대안들의 효과는 많이 감소하는데 A1B의 경우 평균 18.9%, A2 시나리오의 경우 36.1%로 나타났다. 특히 하수처리장 건설의 경우 효과감소 폭은 평균 32.0%로 나타났다. 목표수질 만족일수의 경우 평균 54.1%~60.9% 감소하는 것으로 나타났다. 즉 소규모 하수처리장의 경우 유역의 물순환에 대해 건기의 유량과 전반적인 수질에 크게 영향을 미치므로 기후변화로 인한 영향이 중요함을 알 수 있다. 특히 인간이 생활하는데 중요한 목표 유

지유량 및 목표 수질 만족일수가 크게 감소하는 것으로 보아 기후변화로 인한 인간의 피해가 훨씬 클 것으로 예상된다. 따라서 유역의 상류에 건설되는 소규모 하수처리장 건설의 경우 반드시 기후변화에 대한 영향을 고려해야 한다.

미래의 기후 및 환경 변화는 불확실성이 크기 때문에 정확한 예측은 쉽지 않다. 그러나 지금의 추세대로라면 기온의 상승과 강수의 편중이 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 계획을 수립하는데 반드시 필요하다.

사 사

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-3)의 서울대학교 공학연구소를 통한 연구비 지원(90%)과 Safe and Sustainable Infrastructure Research(SIR)의 연구비 지원(10%)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 김경태, 정은성, 김상욱, 이길성, 성진영(2009). 우리나라 오염총량관리제도의 개선 및 적용: 1. 안양천 유역의 오염부하량 산정. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(6), pp. 168-176.
- 김주철, 이상진, 신현호, 황만하(2009). 유허곡선의 거동특성을 이용한 유역관리모형의 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(4), pp. 573-579.
- 박경신, 정은성, 김상욱, 이길성(2009). 기후변화 및 도시화에 따른 유허 및 BOD 농도지속 변화. *한국수자원학회 논문집*, **42**(12), pp. 1091-1102.
- 배덕효, 정일원, 권원태(2007). 수자원에 대한 기후변화 영향 평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(I): 유역별 기후시나리오 구축. *한국수자원학회논문집*, **40**(3), pp. 191-204.
- 서울특별시(1998). *지하수배출 전용관로 설치(지하철역) 타당성 조사 및 기본설계*.
- 안소라, 박민지, 박근애, 김성준(2009). 기후변화가 경안천 유역의 수문요소 에 미치는 영향 평가. *한국수자원학회 논문집*, **42**(1), pp. 33-50.
- 이길성, 정은성, 신문주, 김영오(2006). 도시유역의 건천화 방지를 위한 지속가능한 수자원 계획: 2. 적용. *한국수자원학회논문집*, **39**(11), pp. 947-960.
- 이길성, 정은성, 이준석, 홍원표(2007). HSPF 모형을 이용한 안양천 유역의 물순환 및 BOD 부하량 분석. *한국수자원학회논문집*, **40**(8), pp. 585-600.
- 정은성, 이준석, 이길성, 김상욱, 김경태(2007). HSPF 모형을 이용한 안양천 유역의 물순환 건전화 대안기술 효과분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(6), pp. 973-984.
- 정은성, 이길성, 박경신(2008). 다기준 의사결정기법을 이용한 대안 평가지수 개발. *한국수자원학회논문집*, **41**(1), pp. 87-100.

- 조효섭, 정관수, 김재한 (2003). GIUH 적용을 위한 DEM 격자 크기 및 Threshold Area의 민감도 분석. *한국수자원학회 논문집*, **36**(5), pp. 799-810.
- 한수희, 신현석, 김상단(2007). 낙동강 유역관리를 위한 부하량 유향곡선의 적용가능성. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(5), pp. 620-627.
- 현대 Eng. (2005). *안양천 유역종합치수계획 보고서*. 서울지방국토관리청, 건설교통부.
- 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 Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, GA.
- Chaubey, I., Cotter, A. S., Costello, T. A., and Soerens, T. S. (2005). Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty. *Hydrological Processes*, **19**, pp. 621-628.
- 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*, **22**, pp. 4710-4722.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK.
- IPCC (2002). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptations, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK.
- Khan, M. S., Coulibaly P., and Dibike, Y. (2006). Uncertainty Analysis of Statistical Downscaling Methods. *Journal of Hydrology*, **319**, pp. 357-382.
- Kim, M. K., Kang, I. S., and Kwak, C. H. (1997). The Estimation of Urban Warming Amounts due to Urbanization in Korea for the Recent 40 Years. *Journal of the Korean Meteorology Society*, **35**, pp. 118-226.
- US Geological Survey (2001). *PHABSIM for Windows, User Manual and Exercises*. Midcontinent Ecological Science Center, Fort Collins, Colorado, USA.
- Wilby, R. L. and Dawson, C. W. (2007). *SDSM 4.2 User Manual*.