WATER FOR FUTURE

일반기사

도시물순환시스템 구축 최적화 절차 (Protocol)

주 진 철 |
한국건설기술연구원 수석연구원
jcjoo@kict.re.kr

안 창 혁 |
한국건설기술연구원 연구원
chahn@kict.re.kr

1. 서 론

지구온난화와 도시기후 변화에 대응하기 위해 자연의 생태적 기능을 복원하고 환경에 대한 오염부하를 저감하여 도시 환경의 건강성과 지속성을 높이기 위해 도시 내 물순환시스템(urban water circulating system or blue-network)의 구축이 요구된다. 즉, 도시물순환시스템(인공호수, 저류지, 실개천, 유역 내 하천의 연계)을 활용하여 도시 내 다양한 수원(하천수, 호소수, 하수처리수, 우수, 지하수 등)을 네트워크 및 통합 관리하여 도시 내 물순환의 건전성을 증대시키고, 건천화 및 복개된 도시하천의 복원과 실개천과 연계된 녹지(green-network) 등을 조성하여 도시 전체를 저탄소 친수·녹지공간으로 재창출할 수 있다.

이러한 도시물순환시스템과 연계된 저탄소 친수·녹지공간은 시민의 휴식 및 문화 공간 제공, 도심열섬현상 완화, 재해방지, 생물서식공간(biotope) 제공 등의 기본적인 기능 이외에도 탄소배출 감소, 우수저류공간 확보, 지하수위 유지, 비상용수 확보, 대기오염물질 집진 제거, 습지보전 및 생물종 다양성 확보 등의 부가적인 기능을 수행할 수 있기 때문에 구도심의 재개발 또는 신도시를 개발 시 도시 어메니티(amenity) 증진에 널리 적용되고 있다(서울시정개발연구원 2003; 한국토지공사 2003).

그러나, 일부 도시물순환시스템은 계획·설계 당시 수질 및 생태보전에 대한 구체적인 검토 없이 시공됨으로써 오·폐수 등의 점오염원 유입, 강우에 의한 유역 내 비점오염원 유입, 대기 중의 분진 및 오염물질 유입, 퇴적토 축적 및 오염물질 용출 등으로 인해 시민에게 안전하고 생태적으로 건전한 수질의 확보가 어려운 실정이다. 비록 수처리시설(water treatment facilities)이 설치되어 있어도 체계적으로 운영되지 않거나 유지관리가 미흡하여 상당수의 도시물순환시스템은 조류(algae)의 급성장으로 인한 녹조현상에 의해 수체 내 투명도의 저하 및 착색, 악

그림 1. 도시물순환시스템 사례(왼쪽부터 김포한강신도시, 광교신도시, 아산탕정신도시, 용인동백지구)

취 등으로 수질이 악화되어 심미적인 불쾌감을 유발할 정도의 심각한 부영양화(eutrophication) 상태에 이르게 되는 문제점이 발생된다(건설교통부 2002).

이를 방지하기 위해, 도시물순환시스템에 적극적인 수질관리를 위한 수처리시설이 도입되면서 도시물순환시스템에 대한 최적의 유지관리가 가능하였으며, 최근에는 실시간으로 도시물순환시스템 내 수량 · 수질 현황, 오염물질 유입 · 오염원 감지와 수생태계 현황 등을 모니터링하여 상황을 관측 · 분석 · 예측하고 통합제어 할 수 있는 유비쿼터스(ubiquitous) 도시물순환시스템의 도입도 활발하다.

따라서 본고 에서는 도시물순환시스템이 생태적으로 건전하여 다양한 생물서식처를 제공하고, 쾌적한 친수 · 녹지공간으로서 사람과 자연환경을 유기적으로 연결시키는 취지에 부합될 수 있도록 도시물순환시스템의 설계 시 주요 설계 내용 및 고려사항 등을 살펴보고 이를 기술적으로 정량화 · 도식화 할 수 있는 절차(protocol)를 제시하였다.

2. 도시물순환시스템의 설계기법

도시물순환시스템을 구축 시에는 1) 유역 규모를 고려한 입지선정 및 형태/규모, 2) 단일/다중의 수원확보방안, 3) 물수지 분석, 4) 저면처리기법, 5) 호안처리기법, 6) 부영양화 가능성 평가, 7) 수질관리방안 등을 종합 고려해서 각 설계인자를 도출해야한다. 〈그림 2〉는 도시물순환시스템 구축 시 주요 설계 내용 및 고려사항 등을 정량화 · 도식화 한 절차(protocol)로 각 항목별 정량화 수치를 제시하였다. 정량화된 항목별 수치에 근거하여 각 설계인자(parameter)의 합이 각 설계기법 별 설정된 최소기준 이상인 경우 다음 설계기법 단계로 이동하며, 다수의 도시물순환시스템 설계(안) 도출 시 이를 종합적으로 검토할 필요가 있다. 도시물순환시스템 구축 시 주요 설계 내용 및 고려사항은 다음과 같다.

1) 유역 규모를 고려한 입지선정 및 형태/규모
   - 유역 내에서 필요유량 및 목표 수질 유지에 적합한 용수확보가 가능한지?
   - 수원 유입부와 유출부의 위치, 경사 및 형상 등을 조절하여 자연유하방식의 물순환이 용이한지?
   - 오염물질의 유입 방지 및 수질/수생태계가 지

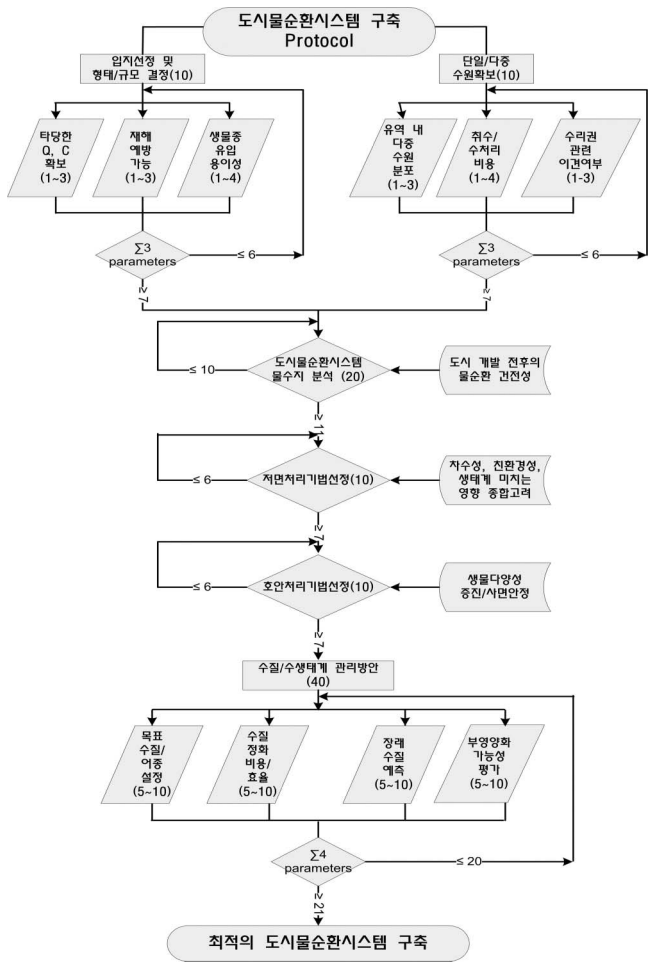

그림 2. 도시물순환시스템 구축 절차(protocol)

속적으로 유지 가능한지?
- 주변 생물서식처로부터 생물종의 이동과 소통이 원활한지?
- 집중호우 및 이상강우에 대한 재해 예방이 가능한지?

2) 단일/다중의 수원확보방안
- 유역의 지리적 특성, 기상조건 및 주변지역에 다중 수원이 분포한지?
- 단일/다중 수원의 수량과 수질이 도시물순환 시스템의 유지용수로 타당한지?
- 단일/다중 수원의 기존 취수 및 도수시설 활용이 가능한지?
- 다중 수원을 공급하고 유지관리 시 소요되는 비용이 타당한지?
- 다중 수원의 수리권 관련 관계부처 및 지자체 간의 이견은 없는지?

3) 물수지분석
- 유역의 개요(지형, 지질, 도시화동향 등), 유역 내 물순환 현황(강수량, 하천 및 지하수 유량, 물의 이용 · 공급 현황, 상하수도 현황, 토지이용도 별 유출량 등)을 종합고려 했는지?
- 도시유역의 물순환모델 [WEP (Water and Energy Transfer Process), SHER (Similar Hydrologic Element Response) 등]을 활용해 도시 개발 전 · 후의 물순환 해석을 실시했는지?
- 우수저류기법을 활용한 침투 트렌치 및 저류지 설치 시 홍수조절 효과의 모의 결과는 타당한지?
- 친수공간 및 생물서식공간(biotope) 제공 등의 기능에 타당한 수질확보를 위해서 필요한 물갈이 용수량은 고려되었는지?

4) 저면처리기법
- 저면과 호안의 침투로 발생하는 누수량을 최소화, 외부로 부터의 지하수 및 불명수의 유입을 방지하기 위한 차수시스템을 선정했는지?
- 화학적, 생물학적 저항력이 우수하여 분해되거나 용출이 발생하지 않아 동 · 식물 및 환경에 대한 위해성은 없는지?
- 차수재의 시공 공사비에 비해 공사비용이 저렴하고 재단 · 설치 · 접합 등이 용이하여 공시기간의 단축이 가능한지?
- 환경친화적이고 기름, 오물, 냄새 등 각종 오염물질에 대한 흡착능이 뛰어나며, 보수 및 시공이 용이하고 내구성이 우수한지?

5) 호안처리기법
- 추이대(ecotone) 역할을 하며 수생식물 및 미소생물(meiofauna)의 서식처를 다양하게 제공할 수 있는지?
- 식생층을 통해 외부 오염원의 직접적인 유입을 막는 완충기능이 가능한지?
- 치수 · 조경 측면 및 경제적 측면 등을 종합 고려하여 선정했는지?
- 호안 및 하상구조물이 어류의 서식처 및 피난처를 제공해 주며, 식재된 초본과 목본이 야생동물의 은신처나 이동경로의 기능을 수행하는지?

6) 부영양화 가능성 평가(Hecky and Kilham 1988; Wetzel 2001)
- 수원의 현재 영양상태(질소, 인 등) 평가 및 오염원 조사를 실시했는지?
- 조류생장잠재력(algal growth potential) 실험을 통해 조류증식의 제한영양염을 추정했는지?
- 제한영양염을 제어할 수 있는 최적의 수처리 공법이 선정되었는지?
- 수체의 부영양화를 예방하고 도시물순환시스템의 목표 수질을 확보하기 위해 수리학적 체류시간이 타당하게 설정 되었는지?

7) 수질 · 수생태계 관리방안

- 도시물순환시스템의 공간별(접촉 · 경관 · 생태적 공간) 타당한 목표수질 및 어종이 설정되었는지?
- 수처리공법 및 설비는 계획처리량, 펌프형태, 목표수질, 장치의 특징, 처리효율, 경제성, 유지관리 등을 종합 고려해 선정되었는지?
- 사람과의 접촉여부, 생물의 유무, 주변 환경 등을 고려하여 적절한 소독 및 살균시설이 선정되었는지?
- 유입수 · 순환수 처리시설인 장치형 정화시설(응집-여과, 가압부상 등)과 자연형 정화시설(인공습지, 인공식물섬, 식생수로 등)을 최적의 위치로 조합되었는지?
- 수질 예측 모델(QUAL2K, WASP 등)을 활용해 통합수질관리시스템이 구축 된 도시물순환시스템의 장기적인 수질 예측을 실시하였는지?

위에 제시된 도시물순환시스템 구축 시 주요 설계 내용 및 고려사항 등을 정량화 · 도식화 한 절차(protocol) 대로 실제 구축된 'K시 도시물순환시스템'을 평가한 결과는 〈표 1〉에 제시하였다. 정량화된 항목별 수치에 근거하여 각 설계인자(parameter)의 합이 각 설계기법 별 설정된 최소기준을 초과해서 최적의 도시물순환시스템 설계(안)이 도출되었다. 이를 근거로 도시 수자원 활용의 건전성 평가를 위해 대안별 평가 및 최적화 모델(optimization model)을 활용해 최적의 도시물순환시스템을 구축할 수 있었다.

표 1. 도시물순환시스템 구축 시 주요 설계 내용 및 K시 도시물순환시스템의 정량화 수치

도시물순환시스템 설계 인자	내용 및 고려사항	K시 도시물순환시스템	
		근거	정량화 수치
입지선정 및 형태/규모 검토 (10)	필요 수량(Q) 및 수질(C) 유지에 적합한 용수확보 타당성	호소수질 I등급의 대규모 농업용저수지와 우수 함양지 구축 통해 유지용수 확보 가능	3
	집중호우 및 이상강우에 대비 재해예방 기능	50년 빈도로 구축하여 재해발생에 미치는 영향 미미	3
	주변 생물서식처로부터 생물종의 이동과 유입의 용이성	환경영향평가 2등급지로서 생물종의 이동과 유입이 용이	3
총합			**9**
단일/다중의 수원확보 방안 (10)	유역 내 다중수원의 분포 여부	대규모 농업용저수지, 지방 하천, 저류지 등의 활용으로 자연유하방식 수원 확보 가능	3
	기존 취수, 도수 시설의 활용여부와 공급 및 유지관리 시 소요 비용의 타당성	기존 농업용수로, 취수탑 활용 가능 및 유지관리 비용이 저렴	4
	다중 수원의 수리권 관련 행정부처 및 지자체 간의 의견 합치 여부	농업용저수지를 주 수원으로 활용 시 수리권 관련 협의 필요	1
총합			**8**
도시물순환 시스템 물수지 분석 (20)	유역의 개요, 물순환 현황, 물이 이용 및 공급 현황, 상하수도 현황 종합 고려 여부	도시 유역 물순환 개요 파악, 상하수도 현황 종합 파악	5
	물순환모델 활용해 도시 개발 전 · 후의 물순환 해석 실시 여부	물순환모델 결과 도시 개발 후 강우 유출량 일부 증대되나 함양지 등 활용하여 초기 유출 감소 효과 파악	4
	우수저류기법 활용하여 홍수조절 효과 모의 여부	우수저류기법(함양지, 저류지, 침투트렌치 등) 활용하여 홍수조절 효과 입증	5
	물갈이 용수량 확보 가능 여부	물갈이 용수량 300일분 확보 가능한 것으로 판명	4
총합			**18**
저면처리기법 (10)	도시물순환시스템 누수량의 최소화, 불명수의 유입 방지 가능 여부	EVA 쉬트(청정호수)와 흙-벤토나이트(생태호수)의 적용으로 $K \leq 1.0\times10^{-8}$ cm/s 확보	5
	친환경성, 시공성, 경제성, 안정성, 유지관리 용이성 등의 종합 분석 후 차수재 선택	친환경성, 시공성, 경제성, 안정성, 유지관리 용이성 종합 고려해서 선정	4
총합			**9**

표 1. 도시물순환시스템 구축 시 주요 설계 내용 및 K시 도시물순환시스템의 정량화 수치 (계속)

도시물순환시스템 설계 인자	내용 및 고려사항	K시 도시물순환시스템	
		근거	정량화 수치
호안처리기법 (10)	생물다양성 증진 및 오염물질 유입의 완충기능 가능 여부	식생호안(생태호수) 조성으로 추이대, 서식처 제공	5
	치수 · 조경 · 경제성 측면 종합 고려 여부	인공호안(청정호수) 조성으로 조경 · 친수공간 제공	5
총합			10
수질/수생태계 관리 방안 (40)	목표 수질/어종 설정 여부	청정호수(호수수질 Ⅲ급수), 생태호수(호수수질 Ⅴ급수) 설정 및 생태호수 대표종 설정	8
	수처리공법/설비 선정 시 목표수질, 처리효율, 경제성, 유지관리 비용 고려 여부	청정호수(디스크필터+UV소독), 생태호수(인공식물섬) 설정	9
	도시물순환시스템의 장기수질예측 여부	WASP활용 장기수질예측 시 목표수질 확보 가능	10
	부영양화 가능성 평가	조류성장가능성 평가 시 부영양화 가능성 희박	8
총합			35

3. 결 론

도시물순환시스템을 설계 시에는 다각적인 검토를 통해 물순환시스템의 입지선정 및 형태 · 규모를 결정해야 하며, 하수 및 우수를 포함한 다양한 수자원을 적극 활용하며, 물수지분석을 통해 도시 수자원 활용의 건전성을 향상시켜야 한다. 또한, 지하수위 및 주변 생태계에 미치는 영향을 고려한 저면처리기법 및 호안처리기법을 선정해야 한다. 도시물순환시스템의 유역별 목표수질은 유입수질, 체류시간, 조성목적, 수처리 및 유지관리 비용 등을 종합 고려하여 설정해야 하며 친수공간의 역할을 할 청정호수와 생물다양성 증진 및 생태공간의 역할을 할 생태호수의 수질관리 방향을 각각 다르게 설정해 주어야 한다. 부영양화 가능성에 대한 평가는 유역별 오염원 조사 및 부하량 산정, 부영양화 평가실험(AGP 등) 및 수질모델링 등을 종합 고려하여 실시해야 한다. 또한, 도시 수자원 활용의 건전성 평가를 위해 대안별 평가 및 최적화 모델(optimization model)을 통해 최적의 도시물순환시스템을 구축해야 한다. 마지막으로 통합적으로 수량 · 수질을 측정하고 실시간 수질관리를 지원할 수 있는 유비쿼터스(ubiquitous)기반 자동모니터링 및 전송시스템과 다양한 소생물권(biotope) 형성 및 식생전이 관련 환경 생태 정보시스템을 구축하여 지속가능한 첨단 저탄소 녹색도시를 구축 할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 서울시정개발연구원, 공원연못 수질개선 방안 연구, 서울특별시. 2003.
2. 한국토지공사, 생태개념을 도입한 호수 · 연못 조성 길라잡이. 2003.
3. 건설교통부, 생태도시 조성 핵심기술 개발 연구보고서, 2002.
4. Wetzel, R G., Limnology 3rd edition. Academic Press. 2001.
5. Hecky, R. E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitaion of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. Limnol. Oceanogr., 33: 796-822.