

Study Note

유희 공간에 LID 기법을 활용한 생태연못의 수질 모니터링

안창혁* · 송호면* · 박준하** · 박점옥** · 박재로*†

한국건설기술연구원 국토보전연구본부*, (주)뉴보텍 기술연구소**

Water Quality Monitoring of the Ecological Pond Constructed by LID Technique in Idle Space

Chang-Hyuk Ahn* · Ho-Myeon Song* · Joon-Ha Park** · Jum-Ok Park** · Jae-Roh Park*

Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology*
NUVOTEC Co., Ltd., Technical Research Center**

요약: 본 연구에서는 도시 내 유희공간을 대상으로 자연적이고 쾌적한 커뮤니티 공간 창출을 위해 LID (low impact development) 기법을 활용한 생태연못 건설을 추진하였다. 생태연못의 제원은 면적 110 m², 평균 수심 0.45±0.02 m 이며, 하상재로는 자갈(gravel) (diameter ≤60 mm), 모래(diameter ≤2 mm), bentonite로 구성하였다. 조성된 생태연못의 연간 유량 특성을 파악하기 위해 강우 및 수심 모니터링을 실시한 결과, 1년간 조사된 총 강우량은 1,287 mm이며 7, 8월에 전체의 약 71.3% (918 mm)를 차지하는 계절적 불균형을 보였으나 보조수원의 공급으로 인해 연간 평균수심은 0.45±0.02 m로 거의 일정하게 유지되었다. 기초수질의 연간 경향은 수온(5.2~28.8 °C), DO (5.0~13.8 mg/L), EC (113~265 μS/cm) 등의 사례를 볼 때 계절에 따른 증감을 나타내었다. 이화학적 수질 중 BOD, COD, TN, TP의 경우 10월 이후에 증가하는 경향을 보였으나 NH₃-N나 PO₄³⁻는 전반적으로 낮았다. 식물플랑크톤 지표인 Chl-a와 BGA (blue green algae)는 7~8월에 급격한 상승을 보였으며 정체수역의 특성에 따라 녹조류 (*Selenastrum bibrainum*, *Pediastrum boryanum* 등)와 사상형 남조류(*Phormidium* sp.)가 주요 종으로 출현하였다. 수중 이온(F⁻, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)은 보존성 물질인 Cl⁻와 강한 상관관계를 보였다 ($R=0.70\sim0.97$, $p<0.05$). 결론적으로 생태연못의 수질은 계절변화 또는 강우와 같은 외부 환경에 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 유량의 증감과 밀접한 관계가 있음을 보였다. 이러한 결과를 근거로 향후 유희공간에 적용된 생태연못의 효과적인 수질관리 및 생물다양성 증진을 위해서는 본 연구에서 조사된 특성들을 참고하여 생태적으로 상호 연계성 있는 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

주요어: LID, 생태연못, 강우, 수질, 유희용지, 생태적 연계성

First Author: Chang-Hyuk Ahn, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea, Tel: +82-31-910-0743, E-mail: chahn@kict.re.kr

Co-Authors: Ho-Myeon Song, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea, Tel: +82-31-910-0293, E-mail: hmsong@kict.re.kr

Joon-Ha Park, NUVOTEC Co., Ltd., Technical Research Center, Wonju 26311, Korea, Tel: +82-33-734-6001, E-mail: ehle139@hanmail.net

Jum-Ok Park, NUVOTEC Co., Ltd., Technical Research Center, Wonju 26311, Korea, Tel: +82-33-734-6001, E-mail: jop0515@hanmail.net

Corresponding Author: Jae-Roh Park, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea, Tel: +82-31-910-0302, E-mail: jrpark@kict.re.kr

Received: 22 October, 2018. Revised: 6 December, 2018. Accepted: 7 December, 2018.

Abstract: The purpose of this study is to construct ecological pond using LID technique in order to create naturally comfortable community space in urban idle space. The specification of the ecological pond is 110 m² of surface area, 0.45±0.02 m of average depth, and bed material is composed of gravel (diameter ≤60 mm), sand (diameter ≤ 2 mm) and bentonite. Rainfall and water depth monitoring were conducted to determine the annual characteristics of inflow of the water for the ecological pond, result of total rainfall was 1,287 mm and showed a seasonal imbalance that accounted for 71.3% (918 mm) during July to August, but the annual mean water depth was kept constant at 0.45±0.02 m due to the secondary water source. Annual trends of basic water quality showed a significant changes according to the season, such as water temperature (5.2 ~ 28.8 °C), DO (5.0 ~ 13.8 mg/L), EC (113 ~ 265 μS/cm). BOD, COD, TN, and TP in physicochemical water quality tended to increase after October, but the ion parameters such as NH₃ and PO₄³⁻ were generally low. Phytoplankton indicators Chl-*a* and BGA (blue green algae) showed a sharp increase from July to August, and green algae (*Selenastrum bibrainum*, *Pediastrum boryanum* etc.) and filamentous blue green algae (*Phormidium* sp.) emerged as a dominant species. The ion parameters (F⁻, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) were strongly correlated with the Cl⁻ as a conservative substance ($R=0.70\sim0.97, p<0.05$). Water quality was influenced by the ambient environment such as seasonal changes or rainfall, and it was closely related to fluctuation of the inflow of the water. In the future, it is necessary to consider ecological connections by referring to the characteristics surveyed in this study in order to effectively manage the water quality and biodiversity of the ecological pond in idle space.

Keywords: LID, ecological pond, rainfall, water quality, idle space, ecological connection

I. 서론

최근 지속적인 도시개발에 따라 LID 기법이 각광을 받고 있다. 도시개발은 많은 사람들에게 생활 편익을 줄 수 있지만 에너지 활용, 사회문제, 환경오염 등과 같은 다양한 부작용도 존재한다. 특히 도시화가 무분별하게 진행될 경우 생태계 서비스를 담당하는 녹지 공간 및 서식처 감소와 같은 부작용이 발생할 수 있으며, 과도한 불투수층의 증가는 자연 물순환 체계를 왜곡하여 홍수나 가뭄과 같은 인공적 재해를 양산할 수도 있다. 따라서 최근 국내외 연구에서는 이러한 문제를 사전에 해결하고 LID 기법을 전략적으로 반영하기 위한 노력을 기울이고 있다(Jia et al. 2012; Shafique & Kim 2018; Shafique et al. 2018).

LID 기법은 침투(infiltration)나 저류(retention)를 통해 물순환체계를 최대한 자연적으로 조절하고 자 하는 친환경 빗물관리 기법 중 하나이자 도시계획

차원의 배수 시스템 개선방안이다(Jia et al. 2012). LID 기법은 그 특성상 도시계획 및 조성 단계에서 반영되는 것이 최선이며 단순히 물순환체계 개선뿐만 아니라 토목, 환경, 에너지, 조경, 예술 등의 분야를 상호 연계 적용 가능한 장점이 있다.

이 중 LID 기법을 활용한 생태연못은 대표적인 저류 시설 중 하나이다. 만약 생태연못을 이용하여 물을 저류한다면 토양에 근거한 육상생태계 뿐만 아니라 수중생태계까지 동시에 활용할 수 있는 공간적인 이점이 있으며 비점오염원 저감, 홍수조절, 열오염 감소, 생태계 보전 등과 같은 다양한 효과를 누릴 수 있다(Jin et al. 2017). 또한, 수공간이 가지는 특유의 어메니티(amenity) 기능을 활용함으로써 도시에 거주하는 사람들에게 쾌적함과 심미적 안정을 제공할 수도 있다.

LID 개념이 반영된 생태연못의 특징 중 하나는 빗물에 의한 유지용수의 확보이다. 최근 적용된 많은

도시 내 생태연못은 다양한 방법을 통해 유지용수를 활용한다. 예를 들면 포장면, 지붕면, 조정공간 등과 같이 빗물 수집이 가능한 모든 접촉면적을 활용하여 용수를 공급하는 방법은 LID 생태연못의 효율적인 운영방법 중 하나이다. 두 번째로 어메니티 기능이다. LID 생태연못은 대부분 도시에 위치하기 때문에 사람들의 접근이 빈번하다. 이러한 장점을 활용하여 연못 자체의 생태적 기능에 추가적인 교육, 여가, 예술 등의 부가적 기능을 가미하는 사례가 많다.

하지만 LID 시설은 공간적인 요소가 크기 때문에 사전에 계획적으로 반영되지 않으면 설치가 어렵다는 단점이 있다. 이러한 점을 해결하기 위한 방법 중 하나는 유휴공간(idle space)을 활용하는 것이다. 도시 개발 과정 또는 조성이 완료된 이후에도 기존 건축물이나 인프라시설이 접근할 수 없는 유휴공간이 발생할 수 있으며 이를 대상으로 LID 기법을 적극적으로 활용한다면 생태계와 물순환의 지속가능성 측면에서 효율적인 공간을 재창출 할 수 있을 뿐만 아니라 보다 조화롭고 견고한 도시 조성이 가능할 것이다.

그러나 인위적으로 도시에 설치된 생태연못은 때에 따라 수질 및 생태 기능 유지관리에 어려움이 있을 수 있다. 예를 들면, 폴란드의 도시에 위치한 생태연못은 수질관리 과정에서 의도치 않은 문제점을 보였다. 이 얇은 수심의 연못은 초기에 유기물 증가 및 산소고갈로 인해 생태적 위협을 받았지만 하상을 정비하고 개방수역을 확보한 결과 수질 및 생물다양성이 회복되었다(Jurczak et al, 2018). 하지만 이후에 동물플랑크톤이 증가하였으며 해당 개체를 섭식하는 어종(*Leucaspius delineatus*)이 급격히 증식하는 예상하지 못한 결과를 가져왔다(Jurczak et al, 2018). 이러한 경우를 볼 때 어떤 문제를 해결하기 위해서는 생태적 연계성을 고려한 보다 심도 있는 고찰이 중요하며 사전에 이를 뒷받침 할 수 있는 다양한 모니터링 기초자료가 필요할 것으로 판단된다.

일반적으로 도시에 위치한 소형 연못은 주로 잠자리 서식처로 복원되는 경우가 많다. Goertzen & Suhling(2013)은 독일의 도시 공원 33개 사이트를 조사한 결과 훌륭한 잠자리 서식처로서 가치가 있음을 확인하였다. 하지만 도시에 위치한 수공간은 다양

한 교란요소가 잠재하므로 지속적인 서식처로 활용되기 위해서는 자연적이고 다양한 공간 설계가 필요하다고 제안하였다. 따라서 국내에서도 도시 내 생태연못을 조성하고 효율적으로 유지하기 위해서는 수질, 유량과 같은 다양한 모니터링 결과에 기반 하여 생태적으로 연계성 있는 유지관리 방법론 도출이 필요할 것이다. 하지만 국내의 경우 도시 내 소형 생태연못의 기능을 다각적으로 평가할 수 있는 기초 및 참고자료가 부족하므로 이를 위한 데이터 확보가 우선적으로 필요할 것이다.

본 연구에서는 이러한 배경을 참고하여 LID 기법이 도입된 생태연못을 계획 및 시공하였다. 또한, 강우 및 수심 모니터링을 통해 생태연못의 유량 변화를 조사하였으며, 수질 모니터링을 통해서 연간 수질 변동과 경향을 분석하였다. 본 연구는 향후 도시에 위치한 생태연못이 가지는 다양한 기능 및 가치를 분석하고 생태적으로 적절한 유지관리 기법을 확보하기 위한 기초조사 중 하나에 해당하며 수집된 자료는 사례연구 차원에서 관련 분야의 기본 자료로 활용하고자 하였다.

II. 연구재료 및 방법

1. 생태연못 조성

본 연구에서는 생태연못의 조성단계를 크게 계획(plan), 설계(design), 시공(construction)의 단계로 구분하여 진행하였다(Figure 1). 계획단계에서는 입지 선정, 수원 및 수질 확보 방안, 규모 등을 고려하였으며, 설계 단계에서는 생태연못 조성을 위한 세부사항인 저면 및 호안처리, 생물 서식처, 경관 등을 검토하였고, 마지막으로 시공 단계에서는 구조적 안정성, 서식처 기능, 경제성 등을 포함하여 계획된 세부내용들이 적절히 반영되도록 조치하였다. 이러한 과정은 도시물순환 구축 절차와 유사하지만(Joo & Ahn 2011), 신도시나 대규모 택지개발에 적용할 수 있는 절차 보다는 세부적이고 소규모 단위에 해당한다. 대상 부지는 당초 활용이 적은 협소한 유휴용지였지만 불투수층을 없애고 물과 식생을 도입함으



Figure 1. Overview of construction process for the ecological pond in this study.

로써 집약된 생태 공간 창출을 시도하였고 향후 사람들이 이용 가능한 커뮤니티 공간으로 조성하도록 하였다.

실질적인 생태연못의 조성 과정은 터파기→차수→조경 및 식재→통수의 순서로 진행되었다. 계획단계에서 선정된 부지를 대상으로 터파기 후 벤토나이트로 저면을 차수하였으며 마사토 등으로 하상을 마감하였다. 이 과정에서 추가적인 유량확보를 위해 하상 측면에 지하저류조(corrugated steel structure, 10 m³)를 설치하였다. 지하저류조는 인근 건물 옥상의 집수면(120 m²)에서 수집된 빗물이 관로를 통해 이송될 수 있게끔 구성하였으며 내부에 일정량을 저장하여 필요시에 펌프를 통해 생태연못으로 공급이 가능하도록 하였다. 이외에도 보조수원으로 상수를 활용할 수 있게끔 생태연못 가장자리에 관련 공급시설을 추가적으로 설치하였다.

조경 및 식재 과정에서는 경관뿐만 아니라 생태적 기능을 향상시킬 수 있도록 하상과 호안을 중심으로 조경석을 배치하거나 다양한 수생식물(*Nymphoides indica*, *Typha orientalis*, *Ceratophyllum demersum* L., *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle 등)을 도입하였다. 하지만 식재는 연못의 생태적 기능 및 향후 활착정도를 고려하여 일부만 우선적으로 실시하였다. 통수단계에서는 상수를 우선적으로 도입하였으며 초반에는 협잡물이 수표면에 부상하거나 일시적으로 탁도가 높게 나타날 수 있기 때문에 일부 침수식물은 통수 후 부유물질이 가라앉은 이후에 식재하였다.

2. 강우 및 수심 모니터링

조성된 생태연못의 주요 수원은 빗물(수표면, 건물 옥상 등), 보조수원은 상수로 구성하였다. 해당 연구

대상지는 소형 정수역(lentic system)이기 때문에 강우량에 의한 유량 공급이 중요한 인자 중 하나이다. 이러한 점을 극대화하기 위해 주변 조경시설을 최대한 넓게 확보하였으며 추가적으로 인근 건물의 옥상을 통해 수집된 빗물이 지하저류조로 유입되도록 구성하였다. 또한, 비강우시 및 갈수기에는 증발 및 침투로 인한 생태연못 내 유량 감소가 예상되므로 일정 수심 확보 차원에서 보조수원인 상수를 간헐적으로 공급하였다.

강우량 분석을 위한 일 강우량 데이터는 기상청 자료를 활용하였다(Korea Meteorological Administration 2018). 해당 연구 대상지는 국가에서 운영하는 별도의 기상 관측 지점이 없으므로 지리적으로 가장 가까운 기상청 서울관측소 자료를 기준으로 조사하였다. 보조수원의 유량은 단위시간당 유입되는 양을 현장에서 정량적으로 실측하여 기록하였다.

3. 수질 모니터링

수질모니터링은 크게 기본 항목, 이화학적 수질, 수중 이온 등으로 구분하여 진행하였다. 기본 항목의 측정은 다항목수질측정기(ProDSS, YSI, USA)를 활용하였다. 조사된 항목은 수온, pH, DO, 탁도, 전기전도도(electric conductivity, EC), 총용존고형물(TDS) 이다. 또한, Chl-a와 BGA는 다항목형광측정기(AlgaeCheck, Modernwater, UK)를 활용하여 각각의 농도를 현장에서 측정하였다.

이화학적 수질 분석은 Standard method에 따라 실시하였다(APHA 2005). 시료 채취는 연못의 다리 위에서 실시하였으며, 4 L polyethylene병에 담아 실험실로 운반 후 분석하였다. 본 연구에서 분석된 항목은 COD, BOD, SS, TN, NH₃, TP, PO₄³⁻ 이다. 이외에도 수중 이온 분석을 실시하였으며(APHA



Figure 2. Scenery of LID-based ecological pond over time. (a) The idle space before the construction (February 2011). (b) After the construction of LID-based ecological pond (April 2012). (c) Five years after construction of LID-based ecological pond (April 2017).

2005), 측정된 항목은 F^- , Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Br^- 이다.

추가적으로 생태연못에서 발생하는 1차 생산자인 식물플랑크톤 동정을 실시하였다. 동정을 위해 시료를 현장에서 채취하여 Lugol's solution으로 고정하였다. 고정된 시료는 암실에서 정치한 후 사이펀으로 상등액을 제거한 다음 침전 농축된 시료를 이용하여 종을 동정하였고, 정량분석을 위해 Sedgewick-Rafter counting chamber에 시료 1 mL를 취하여 광학현미경으로 저배율(200배)에서 검경하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 생태연못 조성 결과

Figure 2에 본 연구에서 조성한 생태연못을 시기적으로 나타내었다. Figure 2a는 2011년 2월 전경이다. 당초 본 시설을 조성하기 전 현장은 건물이나 복합시설이 들어오기에 부족한 유휴 공간이었다(Figure 2a). 하지만 부지 활용의 효율성을 높이고 집약된 생태공간 창출이 요구됨에 따라 커뮤니티 시설 구축이 계획되었으며, 이후 생태기능을 강조한 커뮤니티 가든이 조성되었다(KICT 2012).

커뮤니티 가든의 핵심시설인 생태연못의 계획된 제원은 면적 110 m^2 , 평균수심 0.5 m, 최대수심 0.7 m이며 중앙으로 갈수록 깊어지는 구조이다. 연못의 하상재료는 자갈(gravel) (diameter ≤ 60 mm), 모래(diameter ≤ 2 mm), bentonite로 구성되었다.

생태연못의 완공 후 약 1년 후인 2012년 4월은

Figure 2b의 모습을 갖추었으며 이 시점은 식생이 정착하는 초기 단계로서 생태연못 중앙에는 노랑어리연꽃(*Nymphoides peltata*) 군락이 우점하였다. 하지만 생태연못의 구축 후 초기단계에서는 아직 적극적인 생태기능을 수행하기에는 부족할 수 있었다. Figure 2c는 2017년 4월 전경을 나타낸다. 이 시기에는 수차례 계절변화를 거치면서 초기단계보다 안정적인 생태연못의 형태를 보여주었다. 전반적으로 생태연못의 수체 규모는 시간이 흐름에 따라 큰 변화가 없었고, 식생의 서식 밀도는 수심이 얕은 지점을 중심으로 높게 나타났다.

본 연구에서 조성한 생태연못은 한정된 공간임에도 불구하고 빗물 저류 및 강우유출수 관리가 가능한 LID 시설이다. 또한, 이외에도 잠자리 서식처, 어류 피난처 조성, 수질정화 등과 같은 다양한 생태계 기능을 수행할 수 있는 장점이 있다.

2. 강우 및 수심 모니터링 결과

본 연구에서 조사된 강우 및 수심 모니터링 결과는 Figure 3에 나타내었다. 1년간 조사된 총 강우량은 1,287 mm로 7, 8월에 918 mm로 집중되어 전체의 약 71.3%를 차지하였다. 반면에 9월 이후의 강우량은 상대적으로 저조하였으며 1, 2월은 강우량이 38 mm로 매우 적었다. 대한민국은 몬순기후에 해당되어 여름에 강우가 집중되는 것은 자연스러운 현상이며, LID와 관련된 시설의 경우 여름이 유량확보에 가장 유리하기 때문에 이 시기에 적극적인 활용이 필요할 것이다.

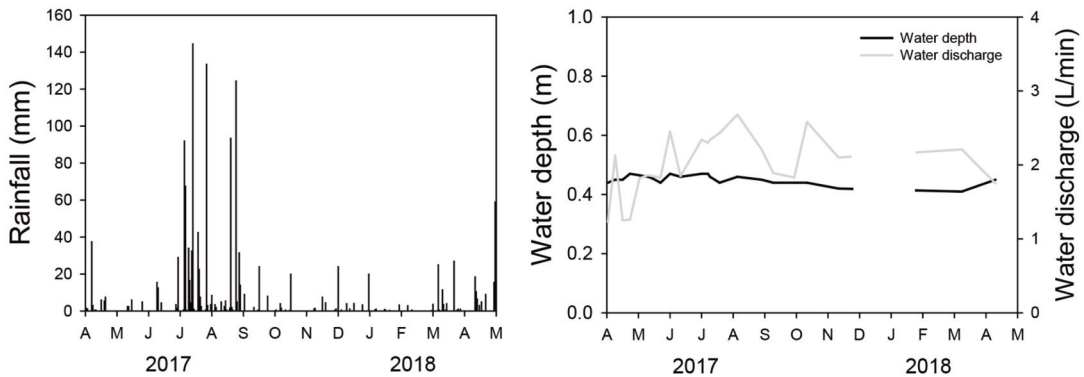


Figure 3. Results of rainfall, water depth and water discharge monitoring in the study.

측정된 생태연못의 실측된 수심은 평균 0.45 ± 0.02 m로 연중 거의 일정하게 유지되었다. 수심은 대상지의 다리 지점에서 측정되었으며 가장 깊은 지점은 약 30 cm 더 깊게 나타났다. 빗물을 주요 수원으로 하는 LID 시설인 본 대상지에서 연간 일정한 수심을 유지할 수 있었던 원인은 지속적으로 보조수원을 공급하고 있기 때문이다. 또한, 본 시설은 평상시 흐름이 없는 정수역이며 유량이 증가하여 수심이 일정 수준 이상으로 상승하면 용수가 우수토실로 자연 배수 되도록 설계된 점을 감안하면 증발 또는 침투로 유실되는 최소한의 보조수원만으로도 연중 일정한 수심 유지가 가능하다. 본 연구에서 생태연못의 공급 유량은 평균 2.0 L/min로 나타났고 증발량이 많은 여름철에는 최대 2.7 L/min까지 증가하였으며 강우 시, 동절기(12~2월) 또는 유량이 충분할 시에는 공급되지 않았다. 보조용수의 일 평균 공급량은 2.9 m^3/day 이며 지속적으로 공급 시 체류시간은 약 17 일(생태연못 체적 약 $50 m^3$)로 파악되었다.

3. 수질 모니터링 결과

본 연구에서 측정된 수질항목은 크게 기본 항목, 이화학적 항목, 수중 이온으로 구분하였다. 기본 항목은 수환경에서 가장 기초가 되는 수질인자이며 기상과 같은 외부 환경의 영향을 크게 받는 항목으로서 Figure 4에 나타내었다.

수온은 8월까지 지속적으로 증가하여 정점을 보인 후에 3월까지 감소하였으며 전체적으로 $5.2 \sim 28.8^\circ C$

의 범위를 나타내었다. 본 연구대상지는 수체가 비교적 작은 편이기 때문에 상대적으로 수온 변동이 크게 나타날 수 있어 이를 고려한 수중생태계 조성 전략이 필요할 것으로 여겨진다. pH는 7.9~9.5 사이의 약 알칼리 조건을 나타내었으며 급격한 변동은 없었다. DO는 4월에 13.8 mg/L의 값을 보였다가 감소와 증가를 반복 후 겨울에 다시 13.7 mg/L까지 상승하는 패턴을 나타내었다. 연중 DO 농도는 5.0~13.8 mg/L를 나타내어 계절에 따른 기복이 큰 것으로 파악되었다. 탁도는 연평균 2.8 NTU 였으나 7~8월 강우기에 상승하였으며 이후 이듬해 3월까지의 지속적으로 감소하였다. 하지만 EC와 TDS는 탁도와 반대되는 패턴을 보였으며, 7~8월 강우기에 급격히 하락하였다가 이듬해 4월까지 상승하였다. 전체적인 기본항목의 연간 경향은 수온, DO, EC 등의 사례를 볼 때 계절적 증감이 나타났으며 이에 따라 수환경에 미치는 영향이 클 것으로 판단된다.

이화학적 항목의 모니터링 결과는 Figure 5에 나타내었다. 대표적인 유기물 항목인 COD, BOD는 전체적으로 10월까지 감소하였다가 그 이후에 증가하는 경향을 보였고 농도 범위는 각각 COD 2.0~4.9 mg/L, BOD 0.9~2.9 mg/L를 나타내었다. COD의 경우 BOD의 약 1.7배 수준으로 일반적인 담수 환경과 유사한 수치를 나타내었다. 본 연구대상지는 고정적인 점오염원은 없었지만 식생 및 수중생물(식물플랑크톤, 어류 등)에 의한 내부 유기물 발생과 강우에 의한 외부 오염원 유입이 이화학적 수질 변화의 주요

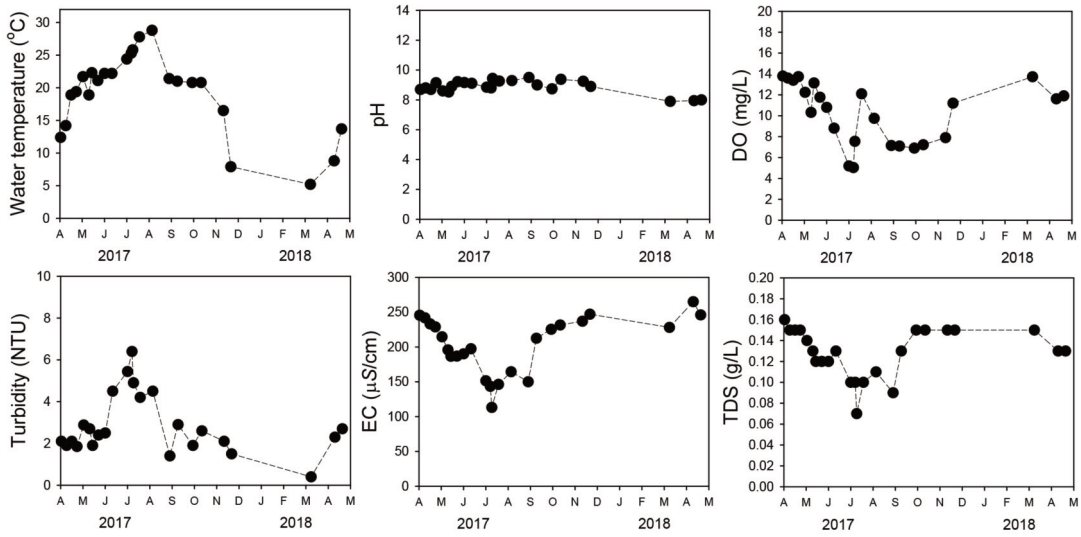


Figure 4. Results of basic water quality parameters in this study.

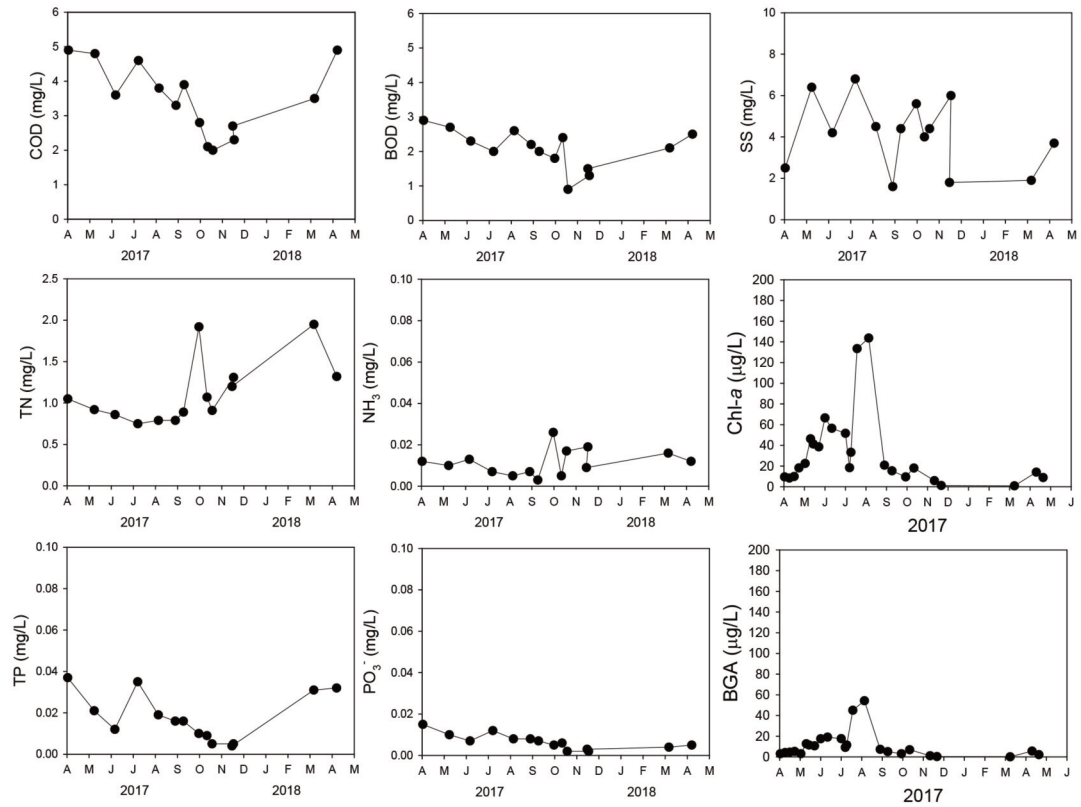


Figure 5. Results of physicochemical water quality parameters in this study.

원인으로 판단된다. 부유성 고형물인 SS은 1.6~6.8 mg/L의 범위를 보여 전체적으로 낮은 수치를 나타내었다. 생태연못에서 조사된 TN 농도는 0.75~1.95 mg/L

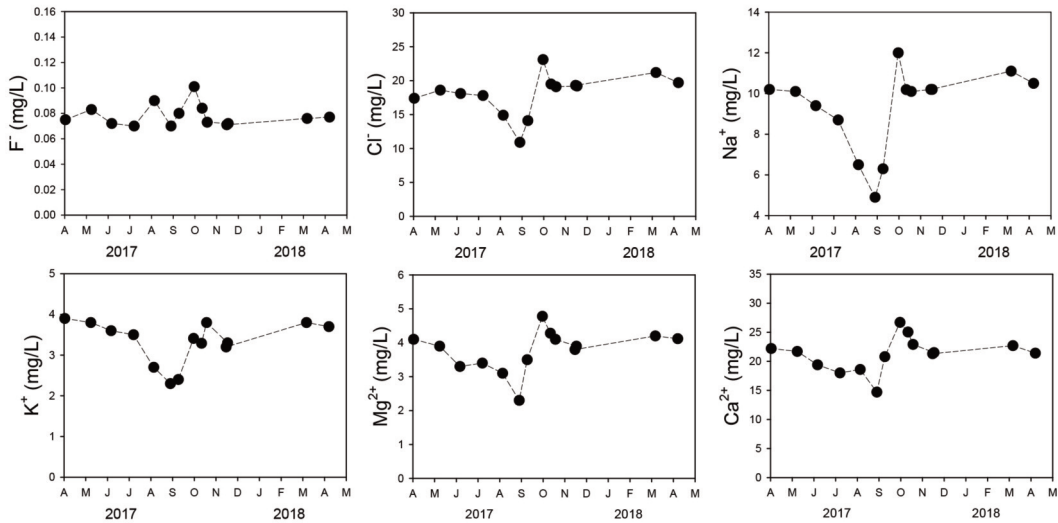


Figure 6. Results of various ions in water in this study.

로서 계절적으로 유량공급(강우, 보조수원)이 많은 7월에 낮았으며 갈수기인 3월에 가장 높았다. TP 농도는 0.005~0.037 mg/L로서 빈영양(oligotrophic)과 중영양(mesotrophic) 범위에 해당 하였으며 (Vollenweider & Kerekes 1980) 11월에 가장 작은 값을 나타내었다. 전체적인 N, P 농도는 강우이외에도 정체수역으로 인한 수중 입자의 침강, 식생에 의한 무기 용존인 흡수 등이 영향을 주었을 것으로 여겨진다.

NH₃ 농도는 0.003~0.026 mg/L로 식물체가 사멸하는 가을~겨울 동안 약간 상승하였다. NH₃는 식물의 질소공급원으로 매우 유용하게 쓰이는 항목 중 하나이며 식물플랑크톤의 성장에도 크게 기여한다 (Suttle & Harrison 1988). PO₄³⁻의 농도는 0.002~0.015 mg/L로서 연중 유사한 농도를 유지하였다. PO₄³⁻는 NH₃와 같이 식물체, 특히 식물플랑크톤의 중요한 성장 제한인자로 널리 인식되고 있어 중요하다 (Interlandi & Kilham 2001). 하지만 본 연구에서 NH₃, PO₄³⁻는 별도의 외부 오염원이 없어 급격한 농도변화는 나타나지 않았다.

수중 이온을 분석한 결과는 Figure 6에 제시하였다. 총 6종의 이온을 분석한 결과, 대부분의 항목이 6월부터 감소하다가 8월에 가장 낮게 나타났다. 특히

보존성 물질인 Cl⁻은 유량의 증감에 따라 좌우되는 대표적인 항목이며 다양한 유량 조사 및 수질모델링에서 검·보정 항목으로 활용할 수 있다 (Chaudhury et al, 1998). 본 연구에서 급격한 유량공급은 7~8월의 강우 유입이 유일하므로 이온의 일시적 감소는 빗물에 의한 희석효과로 판단할 수 있다. 이외에 F⁻, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺와 같은 항목들도 Cl⁻과 유사한 패턴을 보인 점을 미루어 볼 때 전체적으로 강우에 의한 유량의 영향이 크다고 판단된다. 본 연구에서 Br⁻은 분석하였지만 모든 시기에 불검출 되었다.

7~8월에 발생한 이온 농도 감소의 또 다른 이유는 식물플랑크톤에 의한 흡수로 사료된다. 이 시기는 Chl-*a*와 BGA가 가장 높았던 시기이며 이외에도 생태연못에서 서식하는 부착조류, 식생이 풍부한 기간이다. 높은 수온 조건에서 다양한 이온 물질의 급격한 감소는 부착조류의 생체량과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다 (Kim 1999). 하지만 8월 이후에 수중 이온들은 빠르게 기존의 농도 수준으로 회복되었다.

수질항목 간 상관관계 분석결과 기본 항목에서는 수온에 따른 DO, 탁도, EC 등이 상대적으로 높은 수치를 나타내었으며 ($R=0.71\sim0.74$, $p<0.05$) 이화학적 수질은 COD와 TP가 ($R=0.74\sim0.85$, $p<0.05$), 대부분의 수중 이온은 보존성 물질인 Cl⁻와 강한 상관

관계를 보였다($R=0.70\sim 0.97$, $p<0.05$). 강우의 경우는 DO, EC ($R=-0.47\sim -0.59$, $p<0.05$)를 포함한 다수의 항목과 음의 상관관계를 보였다.

상관관계 결과를 미루어 볼 때 생태연못은 수온 변화나 강우와 같은 계절적 영향과 관계가 있었고, 유기물 중심의 수질 특성을 보였으며, 유량 변화와 밀접한 관계를 나타내었다. 또한, 본 연구와 같이 유흥 공간에 적용된 생태연못은 규모가 협소하고 체류시간이 짧으므로 화학적, 생물학적 반응에 제한이 있어 일반적인 담수 환경에서 나타나는 계절적 수질변화 패턴과는 다소 상이할 수 있다. 뿐만 아니라 작은 수체는 기온이나 강우와 같은 외부 기상 환경의 영향을 크게 받을 수 있는 점이 특징적이다.

4. 식물플랑크톤 결과

생태연못에서 수중 일차생산자 현황을 파악하기 위해 식물플랑크톤 분석을 실시하였다. 식물플랑크톤의 광합성 색소를 나타내는 Chl-*a*와 BGA (phycocyanin)는 각각 0.9~143.7 $\mu\text{g/L}$, 0.1~54.3 $\mu\text{g/L}$ 를 보였다. Chl-*a*와 BGA는 봄~여름 기간에 상승하기 시작하였고 7~8월에 가장 높은 값을 나타내었으나 9월 이후에는 성장이 쇠퇴하여 이듬해 봄까지 낮은 수치를 기록하였다. 가장 높은 농도를 기록한 7~8월은 연중 수온이 가장 높고 태양광이 강한 기간이므로 식물플랑크톤이 성장하기에 적합하다. 본 연구대상지는 수심이 얇기 때문에 광의 투과성이 높고 수온이 높게 조성되어 여름철에 급격한 1차 생산자의 성장이 가능하기 때문이다. 식물플랑크톤의 종조성 분석 결과, 6월 총 35종(녹조류 62.9%, 남조류 17.1%, 규조류 11.4%, 기타 8.6%), 8월 총 27종(녹조류 48.1%, 남조류 14.8%, 규조류 29.6%, 기타 7.5%), 10월 22종(녹조류 45.5%, 남조류 9.1%, 규조류 36.4%, 기타 9.0%)로 각각 나타났다. 정체수역의 특성에 따라 녹조류(*Selenastrum bibrainum*, *Pediastrum boryanum* 등)와 사상형 남조류(*Phormidium* sp.)가 주요 종으로 출현하였으며 규조류는 *Achnanthes* sp. 등 호청수성종이 나타났고 일부 부유성 유해 남조류인 *Microcystis* sp.도 소수 출현하였다. 현미경 검경 결과, 전반적인 식물플랑크

톤은 부착조류와 유사한 군집을 나타내고 있어 본 조사수역은 단순 부유성 식물플랑크톤 보다는 부착조류의 탈락에 의한 영향을 크게 받는 군집특성을 나타낸다고 추정된다.

5. 생태연못 수질관리 방안 고찰

해당 절에서는 본 연구에서 제시한 실험 결과 및 현장에서 관찰된 자료를 토대로 생태연못의 수질 관리방안에 대해 고찰하였다. 일반적으로 수심이 얇은 조건에서는 수생식물의 우점이 수질에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 생태연못 초기 조성 단계에서 노랑어리연꽃이 일부 우점 하였으나 시간이 지남에 따라 애기부들(*Typha angustifolia*)이 연못 중앙까지 점차적으로 번성하였다. 생태연못의 하상은 모래와 벤토나이트가 주 성분으로서 애기부들의 근경(rhizomes)이 발달할 수 있는 조건이다. 물론 애기부들을 포함한 각종 수생식물은 부영양화를 억제하여 수질정화를 유도하고 미세입자를 효율적으로 응집시켜 퇴적물의 재부유를 방지하는데 유리하다고 알려져 있다. 하지만 수생식물의 지나친 우점은 수표면의 개방수역을 차단하고 그늘진 조건(shady condition)을 조성하여 최종적으로는 수중생태계에 악영향을 줄 수도 있다(Sharma et al. 2008). 이러한 부분을 미연에 방지하기 위해서는 일부 깊은 수심을 조성하여 씨앗의 발아를 억제하거나 생태연못 중앙으로의 확산을 저지하기 위한 지중격벽설치와 같은 대책이 고려된다.

또한, 도시 내 연못은 잠자리 서식처를 제공하여 생물다양성을 확보하고 생태적 기능을 향상시킬 수 있으므로 이를 고려한 수질관리가 필요하다(Goertzen & Suhling 2012). 최근 도시화에 따른 서식처 파괴 및 생물다양성 감소는 국제적인 이슈이며 이를 해결하기 위해 도시 내에 연못을 조성하여 서식처를 확보하려는 시도가 대안으로 제시되고 있다(Niemela 1999; Cornelis & Hermy 2004; Goertzen & Suhling 2012). 도시 내 생태연못을 잠자리 서식처로 활용할 때 고려할만한 인자는 규모(녹지, 수체), 식생, 수심, 생태 연결성 등이 있으나 Vanacker et al.(2018)는 수질이 Chl-*a* (123 $\mu\text{g/L}$,

TN (2.3 mg/L, 투명도 >67 cm 수준이 필요하다고 제안하였다. 그리고 Goertzen & Suhling(2012)에 따르면 연못의 수표면에 식물플랑크톤 또는 개구리밥이 번무하면 도시 내 잠자리 서식처를 저해할 수 있으며 과도한 영양염류의 유입 및 일시적인 DO 부족 또한 잠자리 유충의 생육에 저해조건이라고 보고하였다. 이러한 점들을 참고하면 향후 도시 내 생태연못을 생물 서식처로 활용하기 위해서는 단순한 수공간 조성뿐만 아니라 적절한 목표수질 및 유지관리 방안이 필요함을 시사하며 그 이전에 면밀한 모니터링 및 현황파악이 중요할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 LID 개념이 가미된 도시 내 생태연못을 건설하고 1년간 다양한 수질인자의 모니터링을 실시하였다. 그 결과 수질 인자의 연중 변동 패턴을 파악할 수 있었으며 다양한 요소들이 생태연못의 수질변동에 영향을 줄 수 있음을 시사하였다. 본 모니터링 결과를 통해 도시 내 수공간의 수질거동을 파악하고 궁극적으로 생태연못 본연의 기능인 생물다양성을 확보하거나 시민들에게 양질의 생태서비스를 제공하기 위해서는 보다 심도 있는 계획과 모니터링 및 유지관리 기법의 연계성 있는 적용이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서 도출한 주요한 연구결과는 다음과 같다.

1) 생태연못의 건설은 크게 계획, 설계, 시공의 단계로 구분하여 진행하였으며 제원은 면적 110 m², 평균 수심 0.45±0.02 m 이며, 하상재로는 자갈 (gravel) (diameter ≤60 mm), 모래(diameter ≤2 mm), bentonite로 구성하였다. 유지용수는 주로 빗물을 활용하였지만 증발 또는 침투로 인한 유실수를 대비하여 보조용수를 평균 2.0 L/min 수준으로 공급하였다. 보조용수의 일 평균 공급량은 2.9 m³/day 이며 지속적으로 공급 시 체류시간은 약 17일(생태연못 체적 약 50 m³)로 파악되었다.

2) 1년간 조사된 총 강우량은 1,287 mm이며 7, 8월에 전체의 약 71.3% (918 mm)를 차지하는 계절적 불균형을 보였으나 연간 평균수심은 0.45±0.02 m

로 거의 일정하게 유지되었다. 이러한 점은 본 연구 대상지가 최소한의 수위를 확보하였기에 비강우시에도 생태계 기능을 충분히 수행할 수 있는 기본적인 조건을 갖췄다고 판단된다.

3) 수질모니터링 결과, 본 연구 대상지는 규모가 작기 때문에 내부 변동보다는 계절변화 또는 강우와 같은 외부 환경에 큰 영향을 받는 것으로 추정되며 여름에 발생하는 많은 강우를 전후로 수질항목의 농도가 증감하는 경향을 보였다. 또한, 수중 이온 중 보존성 물질인 Cl⁻이 타 항목들과 높은 상관관계를 보이는 점은 수질인자들이 유량의 증감과 밀접한 관계가 있음을 시사한다.

4) 도시 유휴공간에 생태연못을 적용하고 지속적으로 유지하기 위해서는 유량, 수질 모니터링 자료 수집에 근거한 연간 특성 파악뿐만 아니라 주변의 교란요소 및 생태적 연계성을 고려하여 궁극적으로는 생물다양성 확보를 위한 보다 다양하고 심도 있는 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 국토교통기술사업화지원사업의 「LID 기반 강우 저류수의 생태연못 재활용방안 (18TBIP-C124749-02)」과제에 의해 수행되었습니다.

References

- American Public Health Association (APHA) 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21th edition.; American Public Health Association, Washington, D.C., USA. p. 1368.
- Chaudhury RR, Sobrinho JAH, Wright RM, Sreenivas M. 1998. Dissolved oxygen modeling of the Blackstone River (northeastern United States). *Wat Research*. 32(8): 2400-2412.
- Cornelis J, Hermy M. 2004. Biodiversity

- relationships in urban and suburban parks in Flanders. *Landsc Urban Plan.* 69: 385-401.
- Goertzen D, Suhling F. 2013. Promoting dragonfly diversity in cities: Major determinants and implications for urban pond design. *J Insect Conserv.* 17: 399-409.
- Interlandi SJ, Kilham SS. 2001. Limiting resources and the regulation of diversity in phytoplankton communities. *Ecology.* 82(5): 1270-1282.
- Jia H, Lu Y, Yu SL, Chen Y. 2012. Planning of LID–BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village. *Separ Purif Technol.* 84: 112-119.
- Jin H, Shao T, Zhang R. 2017. Effect of water body forms on microclimate of residential district, *Energy Procedia.* 134: 256-265.
- Joo JC, Ahn CH. 2011. Optimization protocol of urban water circulation system. *Water and Future.* 44(6): 57-61. [Korean Literature]
- Jurczak T, Wojtal-Frankiewicz A, Kaczkowski Z, Oleksinska Z, Bednarek A, Zalewski M. 2018. Restoration of a shady urban pond e The pros and cons. *J Environ Manage.* 217: 919-928.
- KMA: meteorological data [Internet]. 2017-2018. Korea Meteorological Administration; [cited 2018 Oct 1]. Available from: <http://www.kma.go.kr/>
- Kim B. 1999. Ecology of a cyanobacterial mat community in a Korean thermal wastewater stream. *Aquat Ecol.* 33: 331-338.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). 2012. An experimental project on natural symbiosis in river and lake. p. 87. [Korean Literature]
- Niemela J. 1999. Is there a need for a theory of urban ecology? *Urban Ecosyst.* 3: 57-65.
- Shafique M, Kim R, Rafiq M. 2018. Green roof benefits, opportunities and challenges-A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 90: 757-773.
- Shafique M, Kim R. 2018. Recent progress in low-impact development in South Korea: Water-management policies, challenges and opportunities. *Water.* 10(435): 1-18.
- Sharma P, Asaeda T, Fujino T. 2008. Effect of water depth on the rhizome dynamics of *Typha angustifolia*. *Wetlands Ecol Manage.* 16: 43-49.
- Suttle CA, Harrison PJ. 1988. Ammonium and phosphate uptake rates, N:P supply ratios, and evidence for N and P limitation in some oligotrophic lakes. *Limnol Oceanogr.* 33(2): 186-202.
- Vollenweider RA, Kerekes JJ. 1980. Background and summary results of the OECD cooperative program on eutrophication, In: *Proceedings of an international symposium on inland waters and lake restoration.* U.S. Environmental Protection Agency. EPA 440/5-81-010.