

멸종위기 식물 적용에 따른 영양염류 동태성 분석: 조름나물의 부영양화 제어 효과를 중심으로*

An Analysis of Nutrients Dynamics with the Planting of Endangered Species: Focusing on the effects of eutrophication control for *Menyanthes trifoliata*

최윤의** · 함은경*** · 김민**** · 전진형*****

Choi, Yun Eui · Ham, Eun Kyung · Kim, Min · Chon, Jinhyung

Abstract

The purpose of this paper is to analyze nutrients dynamics depending on biomass of *Menyanthes trifoliata* L., the endangered species, in a small closed-type wetland. In order to understand dynamics between *Menyanthes trifoliata* L. and eutrophication, causal loops and stock-flow diagram were constructed. The result of the model simulation was matched well with monitoring data (*Menyanthes trifoliata* L. biomass, TN, TP, DO). The model was simulated with 3 scenarios. In case of scenario 1, the initial value of biomass was 0mg/L, and the eutrophic state period was 77 days. In case of scenario 2, the initial value of biomass was 35.8 mg/L, and the eutrophic state lasted for 13 days. In case of scenario 3, the initial value of biomass was 71.6 mg/L, and the eutrophic state was nonexistent. The scenario 3 was selected as planting plan of *Menyanthes trifoliata* L. Through this study, planting design with an endangered plant was developed to control eutrophication in small closed-type wetland.

Keywords: 조름나물, 친수공간, 식재설계, 부영양화, 조류

(*Menyanthes trifoliata* L., Waterfront, Planting design, Eutrophication, Algae)

* 본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술개발사업(과제명: 습지생태계 조성 및 자연생태 회복 기술 개발, 과제번호: 416-111-010)”으로 지원받아 수행하였습니다. 이에 감사의 글을 전합니다.

** 고려대학교 대학원 환경생태공학과 석박사통합수료(제1저자, choiuni313@korea.ac.kr)

*** 고려대학교 대학원 환경생태공학과 석사수료(공동저자, 2006220024@korea.ac.kr)

**** 고려대학교 대학원 환경생태공학과 석사과정(공동저자, soniamin@korea.ac.kr)

***** 고려대학교 환경생태공학부 부교수(교신저자, jchon@korea.ac.kr)

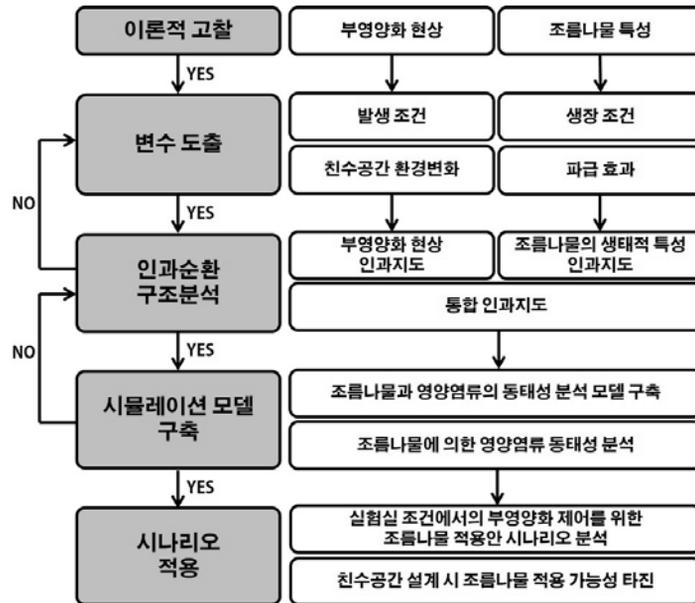
I. 서론

기후변화로 인한 기온의 상승과 기습적 폭우는 도시의 생태환경을 변화시키는 주된 원인이 되고 있다. 이에 따라 하천이나 습지와 같은 수공간에서 기온상승에 의한 수온상승 및 건조화 기습폭우에 따른 비점오염원 유입 및 퇴적물 축적 현상이 나타나고 있으며, 외부 오염물질 유입에 의해 수체 내 질소(N), 인(P), 규소(Si) 등의 영양염류가 증가하는 현상이 나타나고 있다. 영양염류의 증가는 식물의 생체량(Biomass) 변화에 영향을 미치는데, 특히 식물성 플랑크톤인 조류(Algae)가 대발생하는 부영양화(Eutrophication) 현상을 지속시켜 수질을 오염시킨다(Comeaux *et al.*, 2012). 부영양화 현상은 국가하천이나 팔당호, 대청호 등의 대규모 수공간뿐만 아니라 도시 내에서 경관적, 교육적, 생태적, 사회적 효과 등 폭넓은 생태계서비스를 창출하고자 조성한 주택단지 내 인공습지, 공원 내 연못, 옥상습지 등의 소규모 폐쇄형 수공간에서도 빈번히 나타난다. 특히 물놀이 등 친수활동이 활발한 여름철에는 영양염류농도가 높은 수준으로 유지되는 수역에서 남조류(Blue-green algae)가 대발생하여 수질오염을 야기하고, 독성물질과 이취미 물질을 분비하기 때문에 동물성 플랑크톤 및 어류 등 수생생태계와 사람들의 공중보건까지 위협하고 있어(Arquitt & Johnstone, 2004; Paerl *et al.*, 2011) 적절한 해결책이 필요하다.

기존의 부영양화 현상을 제어하는 기술은 조류가 대발생 한 후에 조류 응집제 및 살조제 투입(Kim & Kang, 2003), 수체 환경 변화(Han & Kim, 2001), 포식성 동물성플랑크톤 및 미생물 투입(김의식 외, 1996)등의 조치를 취하는 사후처리 방식이 일반적이다. 이러한 기술은 대규모 수공간에서 조류를 빠르게 제거할 수 있다는 장점이 있으나 그 효과가 일시적이고 부분적으로 나타난다. 이에 효과 유지를 위해서 반복적인 처리 방식을 도입해야 하기 때문에 수생태계에 소규모 폐쇄형 친수공간의 경우 대규모 수공간에 비해 수심이 얕고 물의 유입 및 유출이 제한되어 물의 순환이 정체된 상태이며 사람들의 접근이 쉽기 때문에 대규모의 기술 적용이 어렵고 소요되는 처리 비용에 비해 그 효과가 미미하다. 또한 사후처리 방식은 조류 대발생의 원인 물질인 영양염류가 수체 내에서 제거되지 않아 2차 오염의 가능성이 있다는 한계가 있으므로(이홍수 외, 2010), 소규모 폐쇄형 친수공간에서 영양염류농도 변화에 의한 부영양화 현상을 생태적으로 제어하는 사전처리 방식이 적용되어야 한다.

소규모 폐쇄형 친수공간의 수체 내 부영양화를 제어하는 가장 생태적이며 효과적인 방법은 영양염류의 농도변화에 민감하지 않으며 영양염류 흡수율이 높아 수체 내 영양염류농도를 낮게 유지할 수 있는 수생식물을 적용하는 것이다. 적절한 식물소재의 이용은 건설비와 유지관리비가 적게 소요되며 생물 농축, 생태계 파괴 등 2차오염의 우려가 미미하다는

장점이 있다. 그러나 국내에서 수질정화식물로 친수공간에 적용되는 식물은 갈대, 미나리, 창포 등 약 20종으로 한정되어 있기 때문에 국내에 조성되는 수공간에 천편일률적으로 적용되어 유사한 경관이 창출되고 있어 대상지의 특이성을 잃어가고 있다. 그러므로 친수공간 조성 시 신기성(Novelty)이 확보되며 생태적으로는 영양염류를 제거할 수 있음과 동시에 교육적·산업적·경관적 가치를 창출할 수 있는 유용한 자생식물 선발이 중요하다. 차별화된 친수공간을 조성하거나 복원하기 위해 수질정화 식물 중 신기성을 가진 멸종위기 식물을 도입하면 부영양화 현상 제어와 자생식물을 먹이원으로 하는 초식동물의 먹이망까지 확보할 수 있다. 이를 통해 도시 내 생물 종 다양성 증진을 실현할 수 있고 멸종위기 및 희귀식물의 현지 외 보전을 수행할 수 있다. 이러한 측면에서 최근 옥상습지 등 소규모 폐쇄형 친수공간에 목표종으로 도입되고 있는 멸종위기 야생식물 II급인 조름나물(*Menyanthes trifoliata* L.)에 주목해 볼 필요가 있다. 조름나물은 선행연구에 의해 경관적·생태적·교육적으로 가치가 있는 유용자생식물로 밝혀진 바 있다(한국환경산업기술원, 2013; 허진옥 외, 2015). 그러나 친수공간 조성시 조름나물의 생태적 특성에 따른 부영양화 현상의 동태적 변화를 고려한 도입방안을 밝혀낸 연구는 미미하다. 이에 본 연구에서는 시스템 다이내믹스를 활용하여 메조코즘 조건에서의 부영양화 예측 모델을 구축하여 조름나물의 부영양화 현상 제어 효과를 확인하고, 향후 인공습지 등 소규모 폐쇄형 친수공간 조성시 기초 자료로 활용하기 위해 부영양화 현상을 효과적으로 제어할 수 있는 조름나물 적용안을 마련하고자 한다(그림 1). 첫째, 이론적 고찰을 통해 친수공간에서 발생하는 부영양화 현상과 조름나물의 생태적 특성에 대해 파악한다. 둘째, 이론적 고찰을 토대로 주요변수를 도출하여 부영양화 현상과 조름나물의 생태적 특성에 대한 인과순환구조를 분석한다. 셋째, 인과지도 및 참조모델을 기반으로 조름나물의 생체량, 영양염류농도, 조류농도, 용존산소농도에 대한 시뮬레이션 모델을 구축하여 조름나물에 의한 부영양화 동태성을 분석한다. 마지막으로 조름나물 적용 시나리오 분석을 통해 메조코즘 조건에서 부영양화 현상에 대해 효과적인 제어가 가능한 조름나물의 적정 적용안을 도출하여 향후 친수공간 설계시 적용가능성을 타진한다.



[그림 1] 연구흐름도

II. 이론적 고찰

1. 친수공간에서 발생하는 부영양화 현상

도시 내 친수공간은 사람들의 생활환경을 향상하기 위한 경관감상 및 물놀이, 생태교육의 장이자 생물다양성 증진 및 생태축 연결의 역할을 하는 생물서식처로써, 일반적으로 하천변, 공원, 아파트단지, 공공건물 옥상 등 사람들의 이용이 활발한 인공지반에 조성된다. 인공지반에 조성되는 친수공간은 물, 토양, 식물, 시설물의 하중을 고려하여 규모를 결정하기 때문에 일반적으로 수심이 얇고 물의 유입 및 유출이 제한적임에 따라 빈약한 폐쇄형 혹은 준폐쇄형 수역에 해당한다(이홍수 외, 2008). 폐쇄형 수역인 친수공간에서 생물의 사체가 퇴적되어 유기물이 되거나 식물성장에 필수요소인 질소와 인 등의 비료가 수체에 투입되어 영양물질이 늘어날 경우 수체의 체류시간이 길고 물의 순환이 활발하지 않기 때문에 조류의 성장과 번식이 급속하게 진행되어 대량 증식하는 부영양화 현상이 초래된다. 조류는 생물종에 따라 붉은색, 녹색, 갈색을 띠는데, 일반적으로 친수공간의 담수환경에서 문제시 되고 있는 조류는 남조류로(Paerl *et al.*, 2011), 녹색을 띠기 때문에 조류가 대발생하는 현상을 녹조현상이라 부르기도 한다.

남세균(Cyanobacteria)으로도 불리는 남조류는 엽록소(Chlorophyll-a; Chl-a)를 보유하고 있어 지구에서 광합성을 하는 가장 오래된 물질로(Paerl & Paul, 2012), 질소(Nitrogen; N)와 인(Phosphorus; P) 등의 영양염류가 풍부한 수체 내 수온이 28℃ 정도이며(신재기·조경제, 2000), 충분한 일사량을 받을 때 광합성 작용을 활발히 하여 성장 및 번식을 한다. 도시 내 조성된 친수공간의 경우 대부분 기후조건에 직접 노출되어 있음에 따라 기후변화에 의한 일사량 증가 및 수온상승의 영향을 직접적으로 받기 때문에 남조류 번성을 촉진하는 환경이라 할 수 있다. 친수공간에서 남조류가 번성하면 세포호흡 작용이 증가하여 용존산소 농도를 감소시키고 수체 표층에 부유하여 빛 투과를 차단하여 다른 수생식물군의 광합성을 방해 한다. 또한 일부 포식자인 동물성 플랑크톤이나 저서성무척추동물, 어류, 양서파충류에 악영향을 미치는 마이크로시스틴(Microcystis) 등의 독성물질을 발생하여 수질을 비롯한 먹이사슬과 관련한 수생태계에도 영향을 미치며 지오스민(Geosmin), 2-MIB 등의 이취미 물질을 발생시켜 악취와 불쾌한 맛을 유발하여 친수공간의 이용자나 물 소비자의 심미적 만족도를 저하시키기도 한다(Paerl *et al.*, 2011; Paerl & Paul; 2012). 남조류 번성시 발생하는 수표면의 거품 역시 미관상 불쾌함을 일으키는 단점도 있다. 이렇듯 남조류는 수생생태계에 유해한 영향을 주며 사람들의 건강과 보전까지 위협하고 있어 반드시 제어해야 할 필요성이 있다.

친수공간에서 발생하는 부영양화 현상은 질소, 인 등의 영양염류농도, 용존산소농도(Dissolved oxygen; DO), 수소이온농도, 광량, 수온, 염도 등의 수체의 수질환경(Paerl *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2009)과 수위 및 수면적 등의 물리적 특성, 물의 유입·유출 및 체류시간 등 수리학적 특성, 생물서식특성 등 여러 가지 요소에 의해 결정되며, 계절적으로 변동이 심하기 때문에 정확한 수체 내 영양상태를 판정하는 것은 어렵다(수도 류이치 외, 2007). 수체 내 영양상태를 판정하기 위해 일반적으로 부영양화 현상을 야기하는 주요 원인인 총 인(Total Phosphorus; T-P) 및 총 질소(Total Nitrogen; T-N)의 농도, 엽록소를 가진 조류의 농도를 대변하는 엽록소-a(Chlorophyll-a; Chl-a) 농도, 수체의 투명도 등의 지표를 활용하며, 각 지표의 기준에 따라 <표 1>과 같이 수체의 빈영양, 중영양, 부영양 상태를 판정한다.

〈표 1〉 부영양화 판정 기준

구 분	빈영양상태	중영양상태	부영양상태
총 질소(mg/L)	<0.400	0.400~0.600	0.600~1.500
총 인(mg/L)	<0.015	0.015~0.025	0.025~0.100
엽록소-a (mg/L)	<0.003	0.003~0.007	0.007~0.040
투명도(m)	>4.0	2.5~4.0	<2.5

자료 : Forsberg & Ryding, 1980.

부영양화 판정을 위한 주요 지표인 영양염류는 조류의 급속한 성장에 필수적인 요인으로 작용함에 따라(Paerl *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2009), 장기적인 관점에서 조류를 제어하는 시스템을 실행하기 위해서는 영양염류 농도의 증가를 억제하여 부영양화 현상을 제어해야 한다. 이를 위해서는 기존에 시행되어 온 일회적이고 단편적이며 수생태계의 2차 오염을 유발하는 조류 제어방식보다 수생태계의 메커니즘과 시스템을 고려한 생태학적 측면에서의 해결안이 도출되어야 한다.

2. 멸종위기 식물인 조름나물의 생태적 특성

조름나물은 무환자나무목 조름나물과의 다년생 초본으로 환경부에서 지정한 멸종위기 II 급 수생식물이다. 조름나물은 주로 지하경이 옆으로 뻗으면서 번식하며, 잎자루에서 3개의 잎이 나오고, 지름 1-1.5cm 정도의 흰색 꽃은 4~5월에 총상화서로 피며 열매는 삭과로 지름 5~7mm이다(이광문·김재근, 2011b). 조름나물의 분포지역은 아시아와 유럽, 북아메리카 대륙 및 북극권 지역과 북위 40도 사이의 한대 지역으로(이광문·김재근, 2011a; 2011b; 김홍태 외, 2013) 월 평균 기온 범위는 -45~27℃ 지역에 서식하는 것으로 알려져 있으며(Hewett, 1964), 일본 자생지의 경우 표층 온도가 2-35℃임에 따라(허진욱 외, 2015) 우리나라 대부분의 지역에서 조름나물이 서식할 수 있는 것으로 판단된다. 우리나라에서 조름나물이 자생하는 지역으로는 울진, 대관령, 대암산, 평북, 한남, 함북 등 고산지역의 습원과 동해안의 선유담, 봉포호 등 빈영양상태 호수 주변의 얇은 물가나 이탄습지(Bog)의 부유 이탄매트(Floating peat mat) 등이다(Thompson *et al.*, 1998; Han & Kim, 2006). 특히 조름나물과 갈대가 군락을 이룬 선유담은 환경부 지정 멸종위기 야생동물 II 급인 맹꽂이와 잔가시고기 및 가시고기가 발견되는 등(김홍태 외, 2013) 일반 습지보다 양서·파충류 및 어류의 서식률이 높은 것으로 나타나 생태적 가치가 높은 곳으로 평가되고 있다.

경기도 남양주시에 설치한 인공습지 메조코즘에서 조름나물을 약 3년 여간 모니터링 한

한국환경산업기술원(2013)의 연구에 따르면 조름나물의 가치와 활용도는 자연적 공간뿐만 아니라 인공적 공간에서도 높게 나타남을 알 수 있다. 조름나물의 인공증식을 통한 인공습지 메조코즘 조성 실험에서 <표 2>와 같이 조름나물이 질소와 인을 저감하는 능력이 있으며, 이는 여타의 대형정수식물과 유사 수준의 범위 이상인 것으로 나타났다.

<표 2> 조름나물과 다른 수생식물의 총질소 및 총인 저감율

식물종류	저감율		자료출처
	총 질소	총 인	
갈대	34%	49%	환경부
갈대	36%	28%	농업기반공사
갯버들	31%	49%	환경부
창포	36%	36%	농업기반공사
줄	36%	28%	농업기반공사
독미나리	23~38%	10%	한국환경산업기술원
조름나물	40~59%	32%	한국환경산업기술원

자료: 한국환경산업기술원, 2013: 30.

또한 수면 위에서 지하경을 넓게 뻗어 번식하고 매트형으로 부유하며 생육하기 때문에 개방수면을 적정 수준으로 가려주어 수온을 낮추고, 수체로 유입되는 광량을 차단하여 조류의 성장을 제어할 수 있다.

또한, 인공 조름나물 메조코즘 조성 후 3년 동안 서식하는 수서무척추동물을 조사한 선행연구 결과(허진옥 외, 2015)에서 물달팽이(*Radix auricularia*), 수정또아리물달팽이(*Hippeutis cantori*), 연못하루살이(*Cloeon dipterum*), 검은등실잠자리(*Cercion calamorum*), 애기물방개(*Rhantus pulverosus*), 애넓적물똥뽕이(*Enochrus simulans*) 등이 안정적으로 서식하고 있는 것으로 확인되었다. 이처럼 조름나물은 생물종 다양성을 증진시킬 수 있는 주요 주체로서 가능성을 가진다. 게다가 단일 군락을 형성해 3~10월에 수면 위로 부유하는 연두색 잎과 4~5월에 수려하게 만개하는 흰색 꽃을 가진 조름나물은 아름다운 경관 형성이 가능하여 심미적 가치까지 지니고 있다. 이미 유럽이나 미국 등지에서 이미 수생정원의 관상용 식물요소로 활용하고 있는 바(한국환경산업기술원, 2013) 경관 식재 요소로도 활용도가 높은 식물종이라 할 수 있다. 또한 조름나물이 질소와 인의 풍부한 공간에서 높은 성장률을 보이기도 하지만 기존에 조름나물이 발견된 자생지의 상태가 빈영양상태 임을 비추어보아(이광문·김재근, 2011a; 2011b), 질소와 인이 부족한 공간에서도 서식이 가능하고 용존산소량이 낮은 환경에서도 높은 적응력을 보이는 특성이 있기 때문에(김홍태 외, 2013)

친수공간의 식물소재로써 활용 가치가 높을 것이다.

이와 같이 살펴본 결과 조름나물은 도시 내에서 비오톱을 형성할 수 있는 패치(Patch) 역할이 가능한 종이자 (허진욱 외, 2015) 생태적·환경적·경제적·경관적·심미적 가치가 있는 종이다. 또한 우선적으로 보호·관리되어야 하는 멸종위기 수생식물로써, 식물자체로 희귀성과 신기성을 가지며 습지의 수질정화와 생물종 다양성 증진 및 경관적 가치 상승에도 기여할 수 있는 종이라 할 수 있다.

III. 주요변수의 도출과 인과순환구조 분석

1. 주요변수 도출

이론적 고찰을 통해 살펴 본 친수공간에서 발생하는 부영양화 현상과 조름나물의 생태적 특성과 관련된 변수들을 탐색한 결과를 분야별로 정리하면 <표 3>과 같다.

<표 3> 부영양화 현상 및 조름나물 관련 주요변수

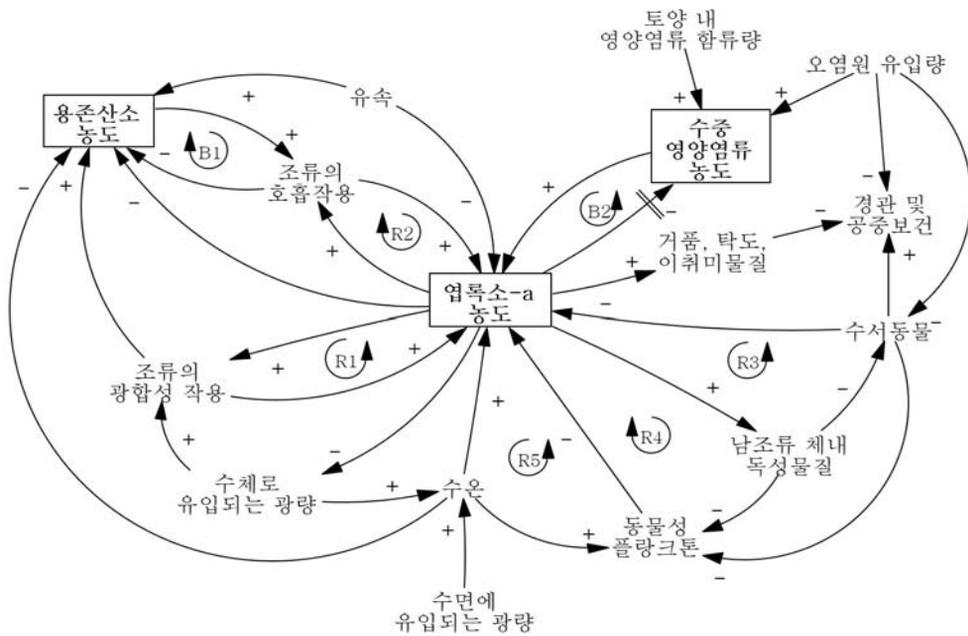
구분		주요변수	변수추출 참고자료
부영양화 현상	부영양화현상 발생 조건	영양염류(N, P), 수온, 용존산소량, 유기물량, 광합성작용, 호흡작용, 빛(광량), 염도, 수소이온농도	Paerl et al., 2001; Chen et al., 2009
	부영양화현상에 의한 친수공간 환경변화	조류 대발생(엽록소-a 농도 증가), 용존산소 감소, 수생식물 광합성작용 저하, 수서동물 및 동물성플랑크톤 성장 방해, 거품유발, 투명도 감소, 경관악화, 공중보건악화	Paerl et al., 2001; 강경수, 2014; 박혜경 외, 2006; 송미영 외, 2001; 정옥영, 2005; 최영아 외, 2013; 최종윤 외, 2012
조름나물 생태적 특 성	조름나물의 생장 조건	광합성 작용, 호흡작용, 용존산소량, 빛(광량), 이산화탄소, 수중 및 토양 내 영양염류(N, P)	Hewett, 1964; Hopkins & Hüner, 1995; 김홍태 외, 2013; 이광문·김재근, 2011a, 2011b
	조름나물에 의한 친수공간 환경변화	영양염류 제거, 수온상승 예방, 수서동물 서식처 제공, 경관성 확보, 교육적 효과 확보, 공중보건 확보	김홍태 외, 2013; 이광문· 김재근, 2011a, 2011b; 한국환경산업기술원, 2013

도출된 주요변수를 중심으로 부영양화 현상 및 조름나물의 생태적 특성에 대한 개별 인과순환구조 분석을 실시하였으며, 통합 인과지도 작성을 통해 조름나물의 부영양화 현상

제어 기작에 대한 인과순환구조 분석을 실시하였다.

2. 부영양화 현상 인과순환구조 분석

친수공간의 부영양화 현상에 대한 인과지도는 수중 영양염류의 농도와 엽록소-a의 농도의 동태적인 변화를 중심으로 설명된다(그림 2).



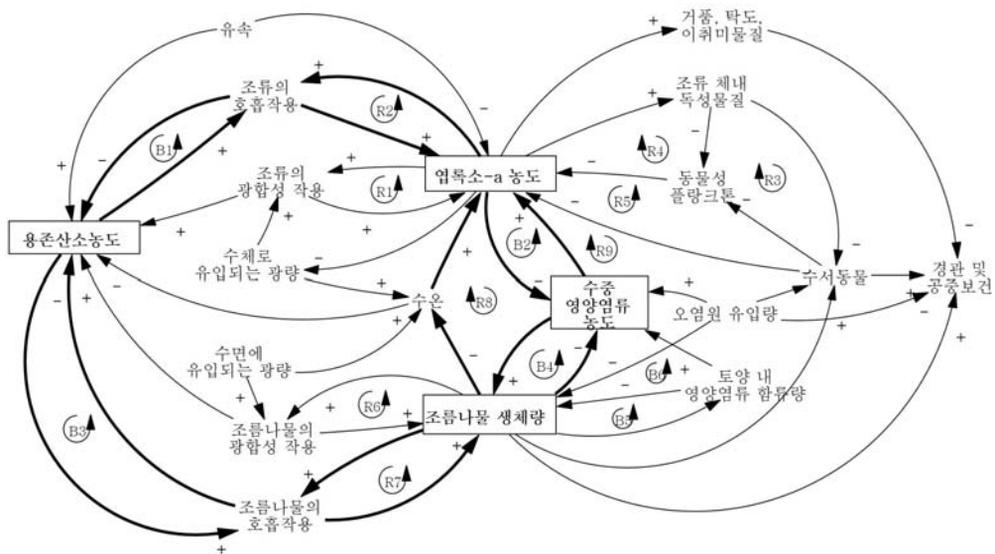
[그림 2] 부영양화 현상 인과지도

친수공간의 담수환경에 서식하는 대부분의 조류는 엽록소를 보유하고 있어 기본적으로 광합성을 통해 성장 및 번식을 함에 따라 엽록소-a 농도는 수체 내에 존재하는 조류의 양을 대표한다. 따라서 엽록소-a 농도의 증가와 감소는 조류 양의 증가와 감소를 의미한다. 조류는 광합성 작용을 통해 조류 체내로 흡수되는 유기양분과 용존산소량을 증가시키며 (R1), 세포호흡작용을 통해 용존산소량을 소모하는 호기성 생물이다(R2, B1). 조류의 성장과 번식을 촉진하는 요인은 높은 영양염류농도, 용존산소농도, 수온, 광량 등이 있으며 이 중에서 영양염류는 조류 성장의 필수요인이다. 조류가 수체 내 영양염류를 흡수하면서 성장하는 이 관계는 균형의 관계(B2)로 유지된다. 그러나 비점오염물질이나 습지식물의 성장을 위한 비료가 지속적으로 유입되는 경우 영양염류농도가 크게 증가하면서 조류의 대발생

로 성장하는 경향을 보인다. 이는 수중 영양염류의 농도가 높을 경우, 조름나물이 흡수할 수 있는 영양염류양이 많아지므로 조름나물 생체량이 증가하고, 영양염류농도가 점차 감소하는 균형관계가 형성된다는 것을 의미한다(B4). 또한, 조름나물은 호안이나 부유성 매트에 주 지하경을 고정하고 수체 표면으로 지하경을 뻗으면서 성장 및 번식하기 때문에 토양 내 영양염류를 흡수하는 특성이 있으며(B5), 이를 통해 토양 내 영양염류가 수중으로 용해되는 양을 저감하는 작용을 하기도 한다(B6). 또한, 조름나물은 수체 표면에 부유하여 군락을 형성하기 때문에 수서동물에게 서식처, 은신처, 휴식처로써 공간을 제공하며, 개방수면을 덮어 수체로 유입되는 광량을 감소시켜 수온상승을 예방하는 역할을 하는 것을 알 수 있다.

4. 조름나물의 부영양화 현상 제어 인과순환구조 분석

친수공간에서 조름나물이 부영양화 현상을 제어하는 특성을 이해하기 위하여 상기 도출된 부영양화 현상 인과지도와 조름나물의 생태적 특성 인과지도를 [그림 4]와 같이 통합하였다.



[그림 4] 조름나물의 부영양화 현상 제어 효과에 대한 통합 인과지도

조류와 조름나물은 모두 식물생장의 필수요소인 용존산소와 영양염류를 공통된 기반으로 성장함에 따라 경쟁관계에 있다(Hopkins & Hüner, 1995). 엽록소-a농도(조류 농도)와 수

중 영양염류농도의 인과순환구조와 조름나물 생체량과 수중 영양염류농도의 인과순환구조는 두 개의 균형루프로 연결되어 있지만(B2, B4), 엽록소-a농도, 수중 영양염류농도, 조름나물 생체량의 전체적인 구조는 강화구조이다. 따라서 수중에 영양염류농도가 높아지더라도 조류가 대발생하기 이전에 영양염류를 흡수하는 조름나물 생체량을 확보하면 조름나물이 영양염류를 선점함에 따라 조류 성장 제어 효과를 기대할 수 있다(이광문 · 김재근, 2011b). 엽록소-a농도, 용존산소농도, 조름나물 생체량의 전체적인 구조 또한 같은 양상을 보인다(B1, B3). 혹여, 조류 대발생을 초기에 제어하지 못하여 용존산소농도와 수중 영양염류농도가 감소한 친수공간이라도 조름나물 특성상 빈영양상태와 낮은 용존산소농도 등 열악한 환경에서도 잘 적응하여 성장하는 특징이 있기 때문에 부영양화 현상에 의해 훼손된 친수공간의 생태계를 안정화시키는 역할을 할 수 있다. 이는 높은 용존산소량과 다량의 영양분을 요구하는 기타 정수식물과의 차별화된 조름나물만의 특성이다. 한편, 친수공간에 일반적으로 식재되는 정수식물은 주로 호안을 따라 성장하여 수면을 노출시키지만, 조름나물은 지하경을 수면위로 뻗으며 부유매트 형태로 성장하기 때문에 수면을 덮어 그늘을 형성하므로, R8과 같이 수온을 떨어뜨려 조류의 증가를 억제할 수 있다. 조름나물 도입 후 친수공간 생태계가 점차 안정화되면 복족강의 애기물달팽이(*Bakerlymneare uiridis*)나 절지동물 곤충강의 하루살이목(Ephemeroptera), 잠자리목(Odonata) 등 다양한 생물들이 유입되어 조류를 포식하므로(Odum *et al.*, 1971), 조류의 성장량을 제어할 수 있을 것이다(R9). 이 밖에 조름나물이 가진 경관 및 공중보건 증진 효과가 부영양화 현상으로 나타나는 악영향을 완화시킬 수 있을 것이다. 이처럼 조름나물은 부영양화 현상을 제어하는 생태적 기작을 예상할 수 있음에 따라 친수공간의 새로운 식물소재로써 활용가치가 높을 것으로 사료된다.

IV. 시뮬레이션 모델의 적용과 분석

1. 시뮬레이션 모델 구축

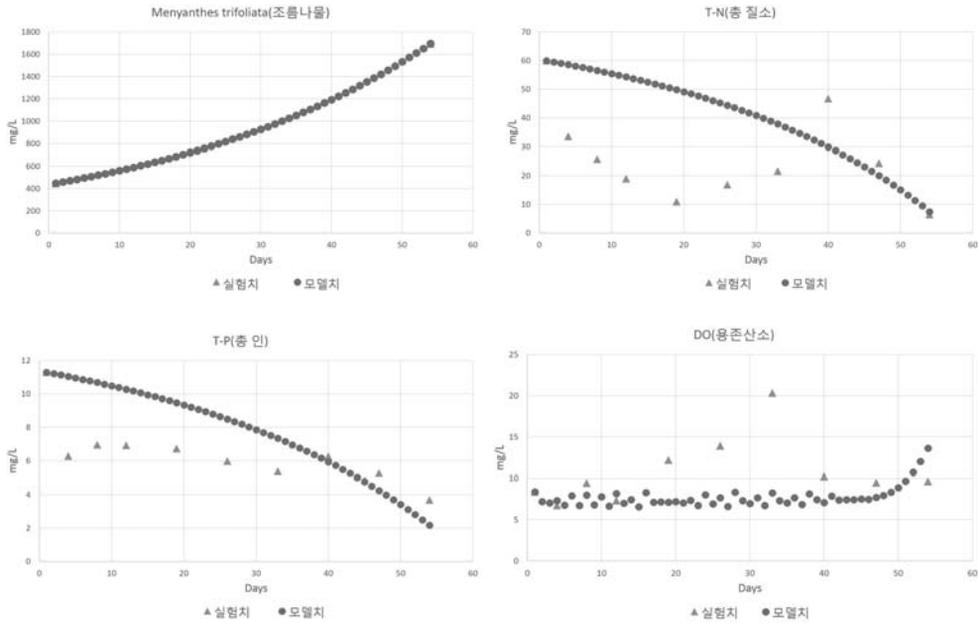
부영양화 현상과 조름나물의 생태적 특성 인과지도에서 주요하게 나타난 변수인 조름나물의 생체량(*Menyanthes Trifoliata*), 총 질소농도(T-N), 총 인농도(T-P), 엽록소-a농도(Chl-a), 용존산소농도(DO)를 저량변수로 활용하여 STELLA 10.0.4을 이용해 [그림 5]와 같이 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 시뮬레이션 모델의 수식을 비롯하여 관련 저량변수, 유량변수, 파라미터의 초기값에 대한 추정 및 설정치는 [부록]에 제시하였다.

시뮬레이션 모델의 기본구조는 대형수생식물과 조류의 생물량 및 이에 따른 인공습지의

영양물질 거동에 관한 모델(김형철, 2010)을 참조모델로 차용하였으며, 본 연구에서 도출한 통합인과지도와 비교하여 참조모델에서 누락된 사항을 보완하여 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 시뮬레이션 모델에 해당 입력 값은 관련 선행연구에서 연구된 바에 근거하여 적용하였으며, 자료가 존재하지 않은 일부 파라미터 등에 대해서는 적절한 가정에 의한 추정값을 부여하였다. 구체적으로, 조름나물의 생체량, 총 질소농도, 총 인농도, 용존산소농도에 해당하는 초기값과 변화값은 차세대 에코이노베이션 기술개발사업의 습지생태계 조성 및 자연생태 회복 기술개발 연구에서 수행한 조름나물의 영양물질 저감 실험 자료를 활용하여 추정하였다(한국환경산업기술원, 2013). 이 실험 자료는 2012년 6월 초부터 7월 말까지 경기도 남양주시 일대 메조코즘 조건하에서 12L(W: 0.2m, L: 0.2m, H: 0.3m) 수조에 조름나물 2개체(개체당 평균 건중량: 895mg)를 식재하고, 초기 용존산소농도가 8.37mg/L인 수체 1L에 농축폐수 기준의 총 질소(60mg/L)와 총 인(11.3mg/L)를 투입한 후 54일간 모니터링을 한 결과이다. 조름나물의 경우 국내에서 멸종위기 종으로 분류되어 보호받고 있는 식물로, 이와 관련하여 수행된 선행연구가 미미하여 조름나물의 성장 및 사멸과 관련된 일부 파라미터는 대형수생식물의 값을 대입하여 모델의 동태를 추정하였다(Kruger & Steynberg, 1930; Bowie & Tech, 1985; 김홍태 외, 2013). 또한 수온과 관련된 파라미터 값은 조류의 생장이 활발한 25~35℃를 조건으로 수행된 연구에서 도출된 자료들을 활용하였다(Kruger & Steynberg, 1930; Lampert, 1987). 아울러 선행연구에서 탐색하지 못한 파라미터의 경우 초기값을 1로 설정 한 후 교정하였으며, 모델에 입력한 단위는 시간을 day, 질량을 mg, 부피를 L로 통일하였다.

2. 시뮬레이션 모델의 동적 행태 분석

구축된 모델의 현실 반영 정도를 살펴보기 위해 실제 모니터링 결과(한국환경산업기술원, 2013)와의 행태 유사성을 분석하였다(그림 6).



[그림 6] 실험데이터와 모델행태의 유사성 분석

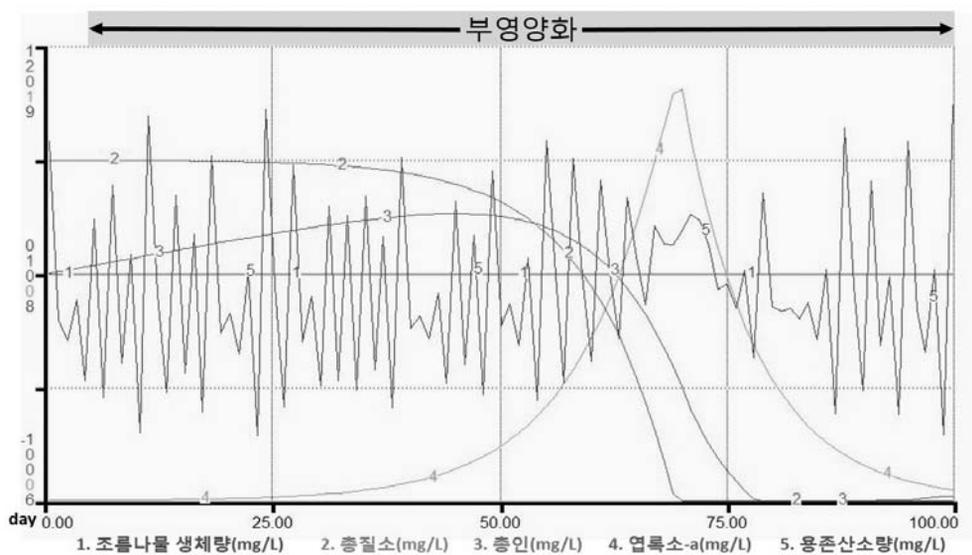
조름나물 생체량(*Menyanthes trifoliata*)은 모델치의 증감 결과가 실험치 행태와 유사함을 확인할 수 있다. 총 질소농도(T-N)와 총 인농도(T-P), 용존산소농도(DO)의 경우, 실험치와 모델치 간의 차이를 보인다. 이는 모델 내에서 조류 성장 온도조건이 28℃로 일정하게 설정된 반면, 실험치는 메조코즘 조성 대상지의 외부 환경으로부터 영향을 받아 등온상태가 아닌 점에서 차이가 발생한 것으로 사료된다(심현의, 1981; 이자연 외, 2010; 임병진 외, 2012).

3. 조름나물 적용방안 시나리오 분석

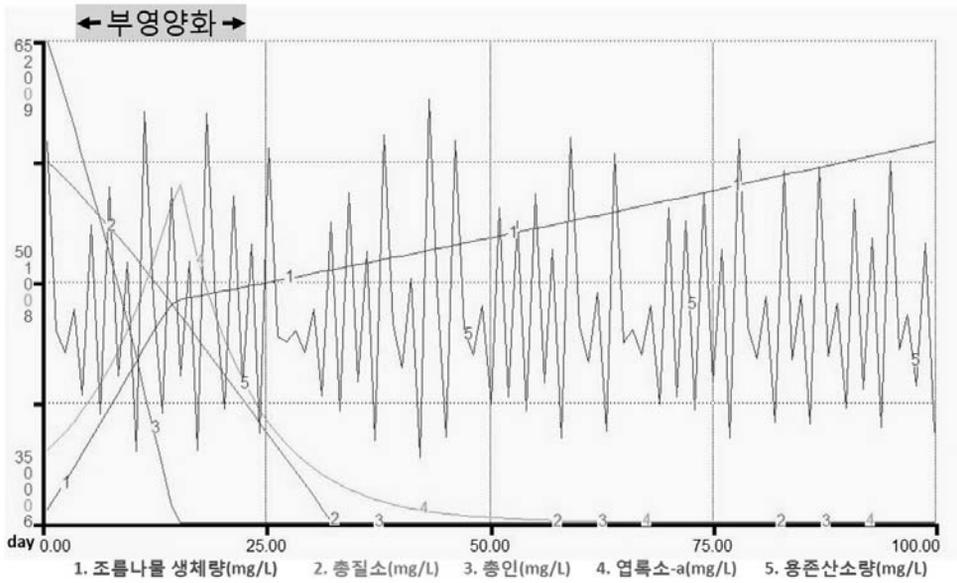
친수공간에 조름나물 적용 시 부영양화 제어 효과 정도를 알아보고자 외부에 의한 유입 수 및 유출수를 배제하고, 수온을 28℃로 유지한 메조코즘 조건에서 빈영양상태(엽록소-a

농도 0.003mg/L)의 수체에 부영양상태 수체(총 질소: 1.5mg/L, 총 인: 0.1mg/L)가 유입된 경우를 가정하고, 조류나물 생체량의 초기값에 대한 3개의 시나리오를 설정하였다. 조류나물 생체량의 초기값은 조류나물 서식의 적정수위인 0.3m를 유지할 경우, m²당 분 수에 의해 설정되었다. 이에 시나리오 1의 경우 0mg/L (0분/m²), 시나리오 2는 35.8mg/L (4분/m²), 시나리오 3은 71.6mg/L (8분/m²)로 설정하여 분석하였다. 부영양화 판단 근거는 <표 1>의 엽록소-a 농도를 기준으로 하였다.

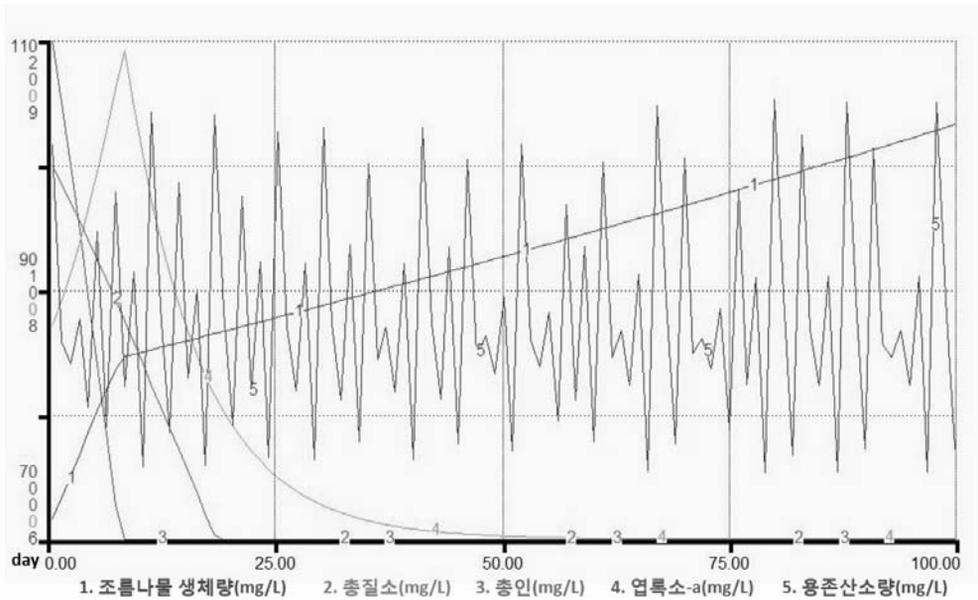
시나리오 1, 2, 3을 적용한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 시나리오 1은 조류나물 0분/m²를 초기값으로 적용한 것으로, 부영양화 기간이 77일로 가장 길게 나타났다. 조류나물을 적용하지 않았을 경우에도 총 인농도(T-P)와 총 질소농도(T-N)가 천천히 감소하는 것이 발견되었는데, 이는 수체 내에 존재하던 조류의 섭취활동 및 광합성에 의한 작용으로 볼 수 있다. 하지만 조류의 왕성한 활동으로 인하여 엽록소-a 농도가 급증하므로 수질이 급격하게 나빠져 부영양화 기간이 가장 길어짐을 확인할 수 있었다(그림 7). 시나리오 2의 경우 조류나물 4분/m²를 초기값으로 적용한 것으로, 부영양화 기간은 13일로 나타나 시나리오 1보다 감소함을 확인할 수 있었다(그림 8). 즉 조류나물 초기 투입량을 증가시킬수록 부영양화 기간이 점차 줄어들고 있음을 파악할 수 있었다. 시나리오 3은 조류나물 8분/m²를 초기값으로 적용한 것으로, 수체 내에 총 인농도(T-P)가 조류나물의 섭취작용에 의해 20일만에 완전히 소멸되었으며, 부영양화 현상도 발생하지 않는 것을 알 수 있다(그림 9). 따라서 친수공간에 조류나물 적용 시 최소 8분/m²를 식재해야만 부영양화 현상에 대해 사전 제어가능하다는 결론을 내릴 수 있다.



[그림 7] 시나리오 1 결과

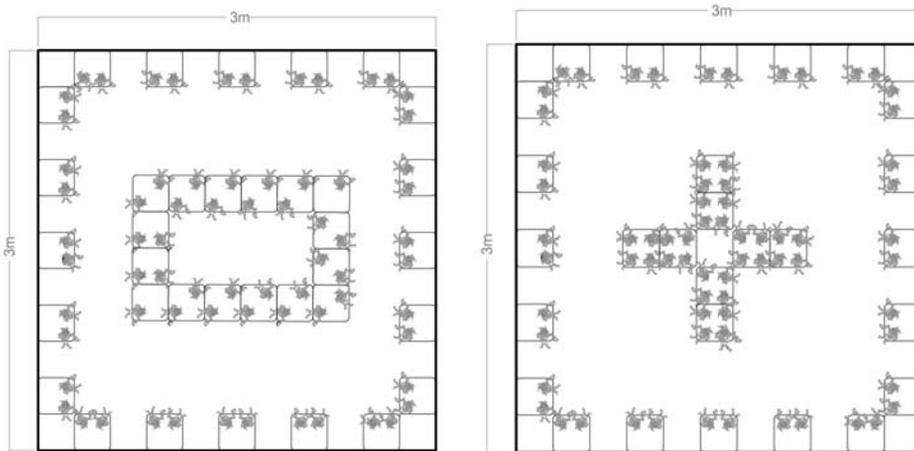


[그림 8] 시나리오 2 결과



[그림 9] 시나리오 3 결과

이와 같은 시뮬레이션 결과를 통해 초기 투입되는 영양염류 외 유입 및 유출을 제어한 조건에서 부영양화 현상을 제어하기 위한 조름나물의 최소 도입 개체수가 8본/m²으로 산출되는 시나리오 3을 채택할 수 있었다. 이를 가로 3m x 세로 3m 정방형이며, 수위가 0.3m로 일정하게 관리되는 친수공간을 조성할 경우 여름철 부영양화 현상을 제어하기 위해 요구되는 최소 조름나물 개체는 72개체에 따라, [그림 10]과 같이 조름나물의 생태적 특성을 고려하여 식재 설계를 할 수 있다.



[그림 10] 친수공간의 부영양화 현상 제어를 위한 조름나물 식재 설계 예시

V. 결론

도시 내 친수공간은 사람들의 생활환경과 생물들의 생태환경이 복잡하게 상호작용하는 공간이기 때문에, 친수공간 조성에 있어서 환경문제에 대응하고 생태회복력의 제고를 위하여 생물소재의 활용방안을 마련하는 것은 매우 중요하다. 이러한 중요성에 따라 본 논문에서는 주택단지 내 인공습지나 옥상습지 등 소규모 폐쇄형 친수공간에서 빈번히 발생하는 환경문제인 부영양화 현상을 친환경적으로 제어하기 위해 신기성 및 생태적·조경적 가치가 확보된 멸종위기 식물인 조름나물을 활용하여 영양염류의 동태성을 분석할 수 있는 인과순환구조와 시뮬레이션 모델을 제시하였다. 본 연구에서 구축된 시뮬레이션 모델에 조름나물 초기 투입량 변화에 대한 시나리오 적용을 통해 폐쇄된 부영양화 수체에서 조류가 대발생하기 전에 질소와 인 등의 영양염류를 제거하여 엽록소-a농도(조류 농도)를 제어할 수

있는 방안을 도출하였다. 시나리오 적용 결과, m²당 8본의 조름나물을 식재하면 평균 수온이 약 28℃인 6~9월동안 부영양화 현상이 나타나지 않은 것으로 나타났다.

본 연구는 물의 유입 및 유출이 제한된 소규모 폐쇄형 친수공간에서 부영양화 현상 발생 시 식물의 자기정화작용을 활용하여 생태회복력을 제고할 수 있는 식재방안을 도출하였다는 점에서 그 의의가 있다고 볼 수 있다. 이는 조정분야에서 기존에 연구되지 않았던 것으로, 생태공간으로 조성된 공간이 조성목적에 부합되며, 정량적으로 얼마만큼의 생태적 기능을 하는가에 대한 논의를 이끌어 낼 수 있다. 그러나 본 연구는 복잡한 자연환경을 5가지의 주요변수로 요약하여 소규모 폐쇄형 친수공간에 한정된 모델을 개발하였으며, 시나리오 적용에 있어 계절적 특성이 분명한 여름철만 고려했다는 한계가 있다. 또한 조름나물이 단일 군락을 형성하여 심미적·생태적 기능을 창출하기는 하지만 친수공간의 특성상 다양한 식생을 활용하여 다채로운 경관 형성을 유도하는 경우가 많기 때문에 동반종을 식재하는 경우에 대한 고민이 필요하다. 따라서 향후 이 연구가 가지고 있는 한계점을 보완하며, 조름나물 외에도 신기성 및 생태적·조경적 가치가 확보된 식물소재를 발굴하여 그의 부영양화 제어 기작을 증명하고 친수공간 식재방안에 대한 연구를 진행할 계획이다. 향후 연구의 최종목표는 다양한 식물소재의 생태적 기작에 대한 연구를 종합하여 정량적인 예측이 가능한 생태공간설계를 실현하는 것이다.

【참고문헌】

- 강경수. (2014). “수중폭기를 통한 정체된 수역의 성층교란 및 그 효과에 관한 연구”, 석사학위 논문, 광운대학교 대학원.
- 김백호 · 강윤희 · 한명수. (2004). “겨울철 녹조발생 원인종 *Stephanodiscus hantzschii*의 생물학적 제어를 위한 미소생물제제의 적용실험”, 『생태와 환경』 제37권 제2호: 236-240.
- 김의식 · 손광수 · 지해성 · 명남진 · 백운화. (1996). “동물 플랑크톤섭식에 의한 인공 연못의 조류 제거”, 『생태와 환경』 제29권 제1호: 65-69.
- 김형철. (2010). “인공습지에 의한 비점오염 저감효과분석”, 박사학위논문, 건국대학교 대학원.
- 김홍태 · 이광문 · 김재근. (2013). “조류나물이 서식하는 동해안 석호 습지인 선유담의 생태적 특성 및 보전방안”, 『한국습지학회지』 제15권 제1호: 25-34.
- 박혜경 · 김화빈 · 이재정 · 이재안 · 이혜진 · 박종환 · 서정관 · 윤석제 · 문정숙. (2011). 연구논문: 한국산 유독 남조류의 독소함량을 근거로 한 조류경보제 발령기준 검토. 수질보전 한국물환경학회지, 제27권 제4호: 491-498.
- 송미영 · 황순진 · 박찬혁.(2001). 『녹조제어 사례에 기초한 녹조방지사업의 적용 방안』. 경기개발연구원.
- 수도 류이치 · 니시무라 오사무 · 후지모토 나오시 · 야마다 가즈히로. (2007). 『환경보전과학 입문』. 서울: 도서출판 그루.
- 신재기 · 조경제. (2000). “생물검정에 의한 남조류 *Microcystis* 가 수질에 미치는 영향”, 『한국환경과학회지』 제9권 제3호: 267-273.
- 신현의. (1981). “인공호에 있어서 육수조건과 plankton의 수직분포에 관한 연구”, 석사학위논문, 이화여자대학교 교육대학원.
- 이광문 · 김재근. (2011a). “조류나물의 성장에 미치는 서식 기질의 영향”, 『한국습지학회지』 제13권 제2호: 355-362.
- 이광문 · 김재근. (2011b). “서식 기질과 동반종이 조류나물의 성장에 미치는 영향”, 『한국습지학회지』 제13권 제3호: 613-621.
- 이자연 · 강대석 · 성기준. (2010). “기준습지 토양특성을 활용한 인공습지의 토양발달 평가”, 『한국습지학회지』 제12권 제1호: 1-14.
- 이홍수 · 정세웅 · 최경규 · 신상일. (2008). “소규모 생태연못(원흥이 방죽)의 부영양화 평가”, 『수질보전 한국물환경학회지』 제24권 제6호: 741-749.
- 이홍수 · 정세웅 · 정희영 · 민병환. (2010). “대천호 수류차단막 설치 위치에 따른 녹조제어

- 효과 분석”. 『수질보전 한국물환경학회지』 제26권 제2호: 231-242.
- 임병진 · 이상규 · 서동철 · 최익원 · 강세원 · 서영진 · 이동진 · 김상동 · 허중수 · 조주식. (2012). “호소저수구역에서 침수식물체의 수온별 영양염류 용출 특성”, 『한국토양비료학회지』 제45권 제4호: 657-663.
- 정옥영. (2005). “조류(Algae)와 수변 및 수생식물이 수질에 미치는 영향”, 석사학위논문, 한국교원대학교 대학원.
- 최영아 · 한난숙 · 임은경 · 김영민 · 전창재 · 이병호. (2013). “회야호의 남조류 발생 특성과 남조류 독소의 농도분포특성; 『대한환경공학학회지』 제35권 제12호: 943-952.
- 한국환경산업기술원. (2013). 『환경기술개발사업 - 습지생태계 조성 및 자연생태 회복 기술 개발 2차년도 보고서』. 한국환경산업기술원.
- 허진옥 · 김홍태 · 김철민 · 배연재 · 김재근. (2015). “식재모듈을 활용한 조름나물(*Menyanthes trifoliata* L.) 인공서식지 조성의 효과” 『한국습지학회지』 제17권 제1호: 53-61.
- Arquitt, S., & R. Johnstone. (2004). A scoping and consensus building model of a toxic blue green algae bloom. *System Dynamics Review*, Vol.20, No.2: 179-198.
- Bowie, G. L., & T. Tech. (1985). *Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling*(2nd ed), Georgia: Environmental Protection Agency.
- Chen, S., X. Chen, Y. Peng, & K. Peng. (2009). A mathematical model of the effect of nitrogen and phosphorus on the growth of blue-green algae population, *Applied Mathematical Modelling*, Vol.33, No.2: 1097-1106.
- Comeaux, R. S., M. A. Allison, & T. S. Bianchi. (2012). Mangrove expansion in the Gulf of Mexico with climate change: Implications for wetland health and resistance to rising sea levels, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.96, No.1: 81-95.
- Forsberg, C., & S. O. Ryding. (1980). Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes, *Arch. Hydrobiol*, Vol.89: 189-207.
- Han, M., & J. G. Kim. (2006). Water-Holding Capacity of a Floating Peat Mat Determines the Survival and Growth of *Menyanthes trifoliata* L. (Bog Bean) in an Oligotrophic Lake, *Journal of Plant Biology*, Vol.49, No.1: 102-105.
- Han, M. Y., & W. Kim. (2001). A theoretical consideration of algae removal with clays, *Microchemical Journal*, Vol.68, No.2: 157-161.
- Hewett, D. (1964). *Menyanthes trifoliata* L., *The Journal of Ecology*, Vol.52, No.3: 723-735.
- Hopkins, W. G., & N. P. Hüner. (1995). *Plants and inorganic nutrients. Introduction to plant physiology*. Toronto: J. Wiley.

- Hopkins, W. G., & N. P. Hüner. (2008). *Introduction to plant physiology*(4th ed), New York: Wiley.
- Kim, B., & P. Kang. (2003). The application of aluminum coagulant for the Improvement of water quality in three recreational ponds, Korean journal of limnology, Vol.36, No.4: 447-454.
- Kruger, L., & M. Steynberg. (1930). *Oxygen Production by Algae: A Futuristic Biomarker for Water Quality*, South Africa: Rand Water Borad.
- Lampert, W. (1987). Laboratory studies on zooplankton cyanobacteria interactions, New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, Vol.21, No.3: 483-490.
- Paerl, H. W., R. S. Fulton, P. H. Moisaner, & J. Dyle. (2001). Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria, The Scientific World Journal, Vol.1: 76-113.
- Paerl, H. W., N. S. Hall, & E. S. Calandrino. (2011). Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change, Science of the Total Environment, Vol.409, No.10: 1739-1745.
- Paerl, H. W., and V. J. Paul. (2012). Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria, Water research, Vol.46, No.5: 1349-1363.
- Thompson, F. L., L. A. Hermanutz, & D. J. Innes. (1998). The reproductive ecology of island populations of distylous *Menyanthes trifoliata*(Menyanthaceae), Canadian Journal of Botany, Vol.76, No.5: 818-828.

▶ 접수일 : 2015. 3. 31. / 수정일 : 2015. 4. 22. / 게재확정일 : 2015. 4. 25.

【부록】

Menyanthes Trifoliata					
구분	변수명	설명	수식	초기값	단위
Stock	MT	조름나물 생물량	$MT(t) = MT(t - dt) + (MT_{in} - MT_{out}) * dt$	447.5	mg/L
In flow	MT in	-	$MT_{in} = IF (MT_{CNt}=0) THEN ((MT_{gr}*(MT_{Ctg}*MT_{CL})/D)*MT) ELSE ((MT_{gr}*S*(MT_{Ctg}*MT_{CL}*MT_{CNt})/D)*MT)$	-	mg/L·day
Out flow	MT out	-	$MT_{out} = (MT_{dr}*MT_{Ctd})*MT$	-	mg/L·day
Parameter	MT CNt	조름나물에 대한 영양물질 제한계수	$MT_{CNt} = (TN/(MT_{halfN} + TN))* (TP/(MT_{halfP} + TP))$	-	없음
Parameter	MT halfN	조름나물에 대한 질소의 반포화상수	-	0.01	mg/L
Parameter	MT halfP	조름나물에 대한 인의 반포화상수	-	0.005	mg/L
Parameter	MT gr	조름나물의 성장률	-	0.026	1/day
Parameter	MT dr	조름나물의 사멸률	-	0.005	1/day
Parameter	MT Ctg	조름나물 성장률의 온도 보정계수	-	3.272	없음
Parameter	MT CL	조름나물 성장률의 광제한계수	-	0.94308	없음
Parameter	D	조름나물의 단위면적당 최대성장계수	-	0.63	없음
Parameter	S	조름나물의 N, P 외 성장계수	-	0.24128	없음
Parameter	MT Ctd	조름나물의 사멸률의 온도 보정계수	-	1.05	없음

T-N					
구분	변수명	설명	수식	초기값	단위
Stock	TN	총 질소량	$TN(t) = TN(t - dt) + (TN_{in} - TN_{out}) * dt$	60	mg/L
Inflow	TN in	-	$TN_{in} = (AlgaedrAlgae * Algae_{fn}) + (MTdrMT * MT_{fn})$	-	mg/L·day
Out flow	TN out	-	$TN_{out} = (AlgaeAlgae * Algae_{fn}) + (MTgrMT * MT_{fn})$	-	mg/L·day
Parameter	AlgaeAlgae	조류성장률* 조류성장량	$AlgaeAlgae = Algae_{gr} * Chl-a$	-	mg/L·day
Parameter	AlgaedrAlgae	조류사멸률* 조류성장량	$AlgaedrAlgae = Algae_{dr} * Chl-a$	-	mg/L·day
Parameter	MTgrMT	조류나물성장률* 조류나물생물량	$MTgrMT = MT_{gr} * MT$	-	mg/L·day
Parameter	MTdrMT	조류나물사멸률* 조류나물생물량	$MTdrMT = MT_{dr} * MT$	-	mg/L·day
Parameter	Algae fn	조류의 질소 분 배율	-	0.13008	없음
Parameter	MT fn	조류나물의 질소 분배율	-	0.04789	없음

T-P					
구분	변수명	설명	수식	초기값	단위
Stock	TP	총 인 량	$TP(t - dt) + (TP_{inflow} - TP_{outflow}) * dt$	11.3	mg/L
In flow	TP in	-	$TP_{in} = (AlgaedrAlgae * Algae_{fp}) + (MTdrMT * MT_{fp}) + Edo$	-	mg/L·day
Out flow	TP out	-	$TP_{out} = (Algae_{gr}Algae * Algae_{fp}) + (MTgrMT * MT_{fp}) + (ktp * TP)$	-	mg/L·day
Parameter	Algae _{gr} Algae	조류성장률* 조류생물량	$Algae_{gr}Algae = Algae_{gr} * Chl-a$	-	mg/L·day
Parameter	AlgaedrAlgae	조류사멸률* 조류생물량	$AlgaedrAlgae = Algae_{dr} * Chl-a$	-	mg/L·day
Parameter	MT _{gr} MT	조류나물 성장률* 조류나물생물량	$MT_{gr}MT = MT_{gr} * MT$	-	mg/L·day
Parameter	MT _{dr} MT	조류나물사멸률* 조류나물생물량	$MT_{dr}MT = MT_{dr} * MT$	-	mg/L·day
Parameter	Algae _{fp}	조류의 인 분배율	-	0.00813	없음
Parameter	MT _{fp}	조류나물의 인 분배율	-	0.0087	없음
Parameter	Edo	DO농도에 따른 인 용출량	$DO * (0.0001)$	-	mg/L

Chl-a					
구분	변수명	설명	수식	초기값	단위
Stock	Chl-a	엽록소-a 농도	$Chl-a(t) = Chl-a(t-dt) + (Algae_in - Algae_out) * dt$	0.003	mg/L
Inflow	Algae in	-	$Algae_in = Chl-a * Algae_gr * Algae_CNt * Algae_Ctg * Algae_CL$	-	mg/L·day
Out flow	Algae out	-	$Algae_out = Chl-a * Algae_dr * Algae_Ctd$	-	mg/L·day
Parameter	Algae gr	조류 성장률	-	2.4	1/day
Parameter	Algae dr	조류 사멸률	-	0.1	1/day
Parameter	Algae CNt	조류 성장률에 대한 영양물질 제한계수	$Algae_CNt = (TN / (Algae_halfN + TN)) * (TP / (Algae_halfP + TP))$	-	없음
Parameter	Algae halfN	조류에 대한 질소의 반포화상수	-	0.025	mg/L
Parameter	Algae halfP	조류에 대한 인의 반포화상수	-	0.001	mg/L
Parameter	Algae Ctg	조류 성장률의 온도 보정계수	-	1.05	없음
Parameter	Algae CL	조류 성장률의 광제한계수	-	0.094	없음
Parameter	Algae Ctd	조류 사멸률의 온도 보정계수	-	1.15	없음

DO					
구분	변수명	설명	수식	초기값	단위
Stock	DO	용존산소 농도	$DO(t) = DO(t-dt) + (DO_{in_Algae} + DO_{in} + DO_{in_MT} - DO_{out_SOD} - DO_{out_BOD}) * dt$	8.37	mg/L
in flow	DO_in	-	$DO_{in} = Ka * (DO_{sat} - DO)$	-	
in flow	DO_in_Algae	조류의 순 광합성량	$DO_{in_Algae} = Algae_{gr} * Algae - (Chl-a * Algae_{respiration_rate})$	-	mg/L·day
in flow	DO_in_MT	조류나물의 순 광합성량	$DO_{in_MT} = MT_{gr} * MT - (MT_{respiration_rate} * MT)$	-	mg/L·day
Out flow	DO_out_BOD	BOD 산소소모량	$DO_{out_BOD} = KBOD * BOD$	-	mg/L·day
Out flow	DO_out_SOD	SOD 산소소모량	$DO_{out_SOD} = (SOD / wetland_depth) * 0.001$	-	mg/L·day
Parameter	DOsat	용존산소 포화농도	-	7.54	mg/L
Parameter	Ka	재폭기계수	-	3	1/day
Parameter	Algae respiration rate	조류 호흡률	-	0.03	1/day
Parameter	MT respiration rate	조류나물 호흡률	-	0.05	1/day
Parameter	BOD	BOD 농도	-	1.76	mg/L
Parameter	kBOD	BOD 제거율	-	0.67	없음
Parameter	SOD	퇴적물 산소 요구량	$SOD = MT * MT_{dr} * 1.0423 * wetland_depth$	-	mg/m ² ·day
Parameter	wetland depth	수심	-	0.3	m