

<불광천 녹조 제거 및 수질 개선 방안에 대한 탐구>

연구자: 강민성, 곽민준, 구민재, 김민서, 서승경, 서재원,
이규빈, 이승훈, 임세환, 정해린, 최정현, 현선빈

《 초 록 》

영문 초록

This study explores the removal of algae and water quality improvement in the artificial river, Bulgwangcheon, as algae proliferation has become a growing concern. Initially, successful efforts were made in increasing the dissolved oxygen (DO) levels in Bulgwangcheon using EM solution and aquatic plants such as Spirodela spp. and Salvinia spp. Additionally, conclusions were drawn on how to improve the water quality of Bulgwangcheon based on the characteristics of these organisms and the EM solution. Subsequently, computational fluid dynamics simulations using Ansys were employed to experimentally investigate the flow rate variations in Bulgwangcheon based on different shapes of stone bridges. Among the rectangular, wedge-shaped, and elliptical stone bridge designs, the elliptical shape was proposed as the most effective in increasing the flow rate of Bulgwangcheon. Lastly, after examining the chemical methods used in the Cheonggyecheon restoration project, the study identified the limitations of Advanced Oxidation Process (AOP) technology and conducted research on alternative chemical methods for algae prevention. It is believed that by employing these three approaches - increasing DO levels, enhancing flow rates, and algae removal - the water quality of Bulgwangcheon can be effectively improved.

목 차

I. 연구 동기 및 목적	04
II. 이론적 배경	03
1. 녹조	03
2. 수질 정화 식물	04
3. EM	03
4. 수질 정화 식물	04
5. 수질검사키트	03
6. 하천 생활환경 기준	04
7. 하천 생활환경 기준 이외의 측정	04
8. Ansys	04
9. 각 모양별 유속 상승에 대한 기대 효과	03
III. 실험 과정	04
1. EM 및 수생생물을 이용한 수질 복구 실험	04
2. Ansys를 이용한 돌다리 모형에 따른 유속 변화 실험	04
IV. 결론 및 고찰	06
1. EM 및 수생생물을 이용한 수질 복구 실험의 결과	06
2. Ansys를 이용한 돌다리 모형에 따른 유속 변화 실험의 결과	06
3. 화학적 개선 방안 조사	06
V. 참고 문헌	06

I. 서론

1. 연구 동기 및 목적

하나고에 다니는 학생으로서 은평구의 유명한 하천, 불광천에 대한 문제를 항상 인식하고 있었다. 불광천은 인공하천이기에, 여름철의 잦은 범람으로 인한 수질 오염, 그리고 녹조 제거 사업에도 사라지지 않은 녹조와 그로 인한 악취는 불광천의 고질적인 문제였다. 불광천의 이러한 문제는 주변지역에 대한 반감을 만드는 등의 문제를 야기했다. 이때, 외국 의 호수와 강에서는 녹조 제거를 위해 여러 분야를 접목시킨 방법을 통해 진행된다는 사실을 알게 되었고, 불광천에 그러한 방법을 적용시키면 좋을 것 같다는 생각을 하여 이번 지역연계 프로젝트를 통해 물리적, 화학적, 생물학적 방제로 녹조를 제거하고, 불광천의 악취 문제를 해결하는 것을 주제로 삼게 되었다.

II. 이론적 배경

A. 녹조

불광천의 가장 큰 문제 중 하나인 녹조의 발생원인은 크게 다음과 같다. 따뜻한 기온, 적절한 광조건, 정지된 물이 녹조가 발생하는 가장 큰 이유이다. 상온에서 물의 DO가 크게 작아져 조류의 번식이 촉진되는데, 조류의 일종인 녹조 역시 함께 번식하며, 녹조의 양이 크게 늘어나게 된다. 또한, 광합성을 통해 에너지를 얻는 녹조의 특성상 적절한 양의 빛은 녹조의 번성을 촉진시킨다. 마지막으로 유동성이 큰 물(움직이는 물)은 유동성이 적은 물(정지된 물)에 비해 녹조가 확산되고 움직이기에 용이하여 녹조가 번성하기에 좋지 못한 조건이다. 따라서, 녹조는 정지된 물에 더 잘 번성할 수 있다.¹⁾

B. 수질 정화 식물

1. 수질정화 식물과 DO 증가

EPA의 DO에 관련한 내용에 따르면, 수생식물들 역시 식물이기에, 광합성을 통하여 대 부분 산소를 물에 내어 놓는다. 즉, 그들은 살아가면서 필연적으로 DO를 늘리게 된다. 본 연구에서는 DO를 늘릴 수 있는 수생식물들과 부가적으로 수질 정화에 효력이 있는 수질 정화 식물들을 이용하여 불광천의 수질을 개선하고자 하였다.²⁾

1) what causes and algae bloom? ,

<https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/air-land-water/water/water-quality/algae-watch/what-are-algae/causes-of-an-algae-bloom>, 2023.11.21.

2) Dissolved oxygen,

<https://www.epa.gov/caddis-vol2/dissolved-oxygen#:~:text=Water%20also%20absorbs%20oxygen%20released,DO%20as%20a%20candidate%20cause>, 2023.11.21

2. 생이가래(Salvinia spp.)

수질정화 기능이 있는 식물들은 성장속도가 빠르고, 조직 내의 영양염류 함량이 높아야 하며 그 지역의 기후에 잘 적응되어 있어야 한다. *Salvinia* spp.는 이 모든 조건을 충족시킨다. 수생식물은 3가지 방법으로 질소를 제거한다. 식물과 부착미생물에 의해서 흡수하는 방법, 암모니아가 휘발되는 방법, 질산화/탈질반응에 의해서 제거된다. 식물이 이용할 수 있는 질소는 암모늄 이온과 질산 이온인데 식물 뿌리에 붙어 있는 미생물이 물 속에 있는 유기 질소를 분해해서 저이온들의 형태로 변환해준다. 그래서 식물이 이 이온들을 흡수하게 된다. 또 질소 제거에 질산화와 탈질화가 기여하기도 한다. 식물을 통해 산소가 대기에서 뿌리로 확산되고 뿌리 부분에 호기성과 혐기성 지역이 공존하는데 이는 질산화와 탈질화를 자극하게 된다. 이에 기체 형태의 질소도 제거가 가능하다.³⁾ 생이가래는 15 ~ 32°C의 온도, pH 6.5-7.5 사이의 액성 그리고 2-15°GH (약 1.9-15°dH)의 경도에서 잘 살 수 있다.⁴⁾

3. 개구리밥(Spirodela spp.)

Spirodela spp.은 전 세계에 널리 분포하는 여러해살이풀이며 수생식물이다. 논이나 연못의 물위에 떠서 살고, 가을에 모체에서 생긴 타원형의 작은 겨울눈이 물속에 가라앉아서 겨울을 나고 이듬해 봄에 물위로 나와 번식한다. 잎의 크기는 길이 5~8mm, 너비 4~6mm이고 앞면은 녹색이나 뒷면은 자주색이다. 엽상체 뒷면 가운데에서 가는 뿌리가 5~11개 나오고 그 옆에서 새로운 싹이 생겨 번식한다. *Spirodela* spp.이 성장하면서 필요로 하는 양분의 대부분이 수생동물들이 배출하는 노폐물에서 비롯되기 때문에 *Spirodela* spp.은 수질정화 효과가 있다고 알려져 있다. 즉, 수중생물이 발생시키는 노폐물의 암모니아를 박테리아가 질산염으로 산화시키고, 이 질산염을 수생식물이 비료로 사용하여 오염물질의 일종인 질산염을 감소시킨다. 개구리밥은 pH 6.0-7.5 사이의 약산성과 약염기성 사이의 액성에서 잘 살 수 있으며, 구체적인 수치를 알 수 없었으나, 낮은 수준의 경도의 물에서 잘 살 수 있다.⁵⁾

C. EM

EM(Effective Micro-organisms)은 유용 미생물군이라는 뜻으로, 일반적으로 효모, 유산균, 사상균, 광합성 세균, 방선균 등 80 여종의 미생물이 들어 있다. 이들은 항산화 작용 혹은 생리 활성물질을 합성하여 부패를 억제하는 등의 역할을 한다. 또한, 악취 제거, 수질 정화 등에 탁월하다.⁶⁾ 특히 시중에서 구매할 수 있는 EM은 돌연변이의 가능성이 굉장히 낮으며, 독성 또한 나타내지 않는다. EM에 포함된 미생물 중, 광합성 세균은 물, 아미노산, 비타민 등을 생산하며 수중에 서식하는 식물들의 생장에 도움을 주고, 사상균

3) 한국환경공학회지, (1995) *Salvinia* spp.를 이용한 영양물질의 제거방안 연구, 안윤주 외. 3-4pp.

4) Duckweed care & control guide, <https://nextaquarium.com/duckweed/>, 2023.11.21

5) Amazon Frogbit - How to Grow and Care for Amazon Frogbit, <https://aquariumtidings.com/amazon-frogbit-care/#:~:text=Water%20Conditions%3A%206.0,care%20for%2C%20floating%20aquarium%20plant>, 2023.11.21

6) Bubbleband, <https://bubblebank.net/m/product.html?branduid=789>, 2023.11.21

(Aspergillus spp.)은 악취에 원인이 되는 물질을 물에서 분리해낼 수 있는 효력을 지닌다.⁷⁾

D. 수질검사키트

본 연구에서는 LaMotte 사의 URBAN WATER test kit을 이용하여 수질을 검사하였다. URBAN WATER test kit은 도시 환경의 학생들에게 제공하는 수질 검사키트로, 박테리아의 존재 여부, 염화 이온, 구리 이온, DO, 경도, 철 이온, 질산 이온, 인산 이온의 농도를 ppm 단위로 측정할 수 있도록 해준다. URBAN WATER test kit은 정확한 값을 제공하는 것이 아닌, 색상으로 대략적인 범위를 제공한다.⁸⁾

E. 하천 생활환경 기준

수질 환경기준은 하천과 호소에 모두 적용되는 9개의 건강항목과 하천과 호소에 각각 5개, 7개씩 적용되는 생활환경항목으로 구성된다. 하천에 적용되는 생활환경 항목과 그에 대한 해석은 <표1>과 같다.⁹⁾ 본 연구에서는 하천의 5개의 생활환경항목 중, pH와 DO에 주목해서 불광천의 등급을 Ia~Ib로 만드는 것을 목표로 하였다.

등급	기준					
	pH	생물 화학적 산소 요구량 (BOD) (mg/L)	부유 물질량 (mg/L)	DO (mg/L ≈ ppm)	대장균군 (군수/100ml)	
					총대장균 군	분위성 대장균군
매우 좋음 (Ia)	6.5-8.5	≤ 1	≤ 25	≥ 7.5	≤ 50	≤ 10
좋음 (Ib)	6.5-8.5	≤ 2	≤ 25	≥ 5.0	≤ 500	≤ 100
약간 좋음 (II)	6.5-8.5	≤ 3	≤ 25	≥ 5.0	≤ 1000	≤ 200
보통 (III)	6.5-8.5	≤ 5	≤ 25	≥ 5.0	≤ 5000	≤ 1000
약간 나쁨 (IV)	6.0~8.5	≤ 8	≤ 100	≥ 2.0		
나쁨 (V)	6.0~8.5	≤ 10	쓰레기 등이 떠있지 아니할 것.	≥ 2.0		
아주 나쁨 (VI)		> 10		< 2.0		

<표1>

7) 대한건강의료지원단, https://khms.or.kr/healthy_life/ecofriendly_life/em_life/em, 2023.11.21

8) 종합수질검사키트, <https://www.biozoa.co.kr/goods/view?no=604>, 2023.11.21

9) 칠곡군 홈페이지, <https://www.chilgok.go.kr/portal/contents.do?mId=1107010100>, 2023.11.21

F. 하천 생활환경 기준 이외의 측정

1. 질산염, 인산염

질산염, 인산염 등의 무기 영양염류는 물 속에 다량 유입될 시 녹조를 발생시켜 하천을 오염시킨다. 무기 영양염류의 증가로 하천이 부영양화되면, 조류 등의 식물성 플랑크톤이 급증하고, 이로 인해 생물 군집은 변화한다. 이렇게 조류의 양이 급증하는 것은, 여러 문제를 초래하는데, 그중 하나가 용존산소의 고갈, 남조류의 독소로 인한 어패류의 폐사이다. 즉, 질산염과 인산염의 농도는 부영양화의 진행 여부를 판단할 수 있는 척도가 되며, DO 측정은 부영양화로 인한 녹조류 증가율을 판단할 수 있는 척도가 되기에, 실험에서 중요하게 판단하여 측정하고자 하였다.¹⁰⁾

2. pH

주로 pH가 감소하여 하천수가 산성화되는 것으로 나타나는 하천수의 pH 변화는, 하천수에 서식하는 미생물 군집에 큰 영향을 미친다. 수중 생태계에서 일차 생산자 역할을 수행하는 담수조류 군집이 크게 변화하게 되며, 이러한 조류 군집에 의존하는 소비자의 생존과 이의 분포 역시 영향을 받아 변화하게 된다. 이러한 맥락에서, 하천수의 pH 변화는 생태계 안정성에 큰 위협이 될 수 있다. 따라서, 본 실험에서는 생태계 안정성을 확인하고자 하천수의 pH를 측정하고자 한다.¹¹⁾

3. 철분

철분이 많은 물은 욕조나 싱크대에 오렌지색 얼룩을 남기거나, 옷과 접시를 녹슬게 할 수 있다. 뿐만 아니라, 철 함량이 일정 수준 이상을 초과한 물을 지속적으로 섭취할 경우 혈색증을 유발할 수 있다.¹²⁾ 따라서, 인체에 대한 안전성과 생활용수로써의 적합성을 고려하여 철 함량을 측정해보고자 한다.

4. 경도

경도는 물에 들어있는 칼슘과 마그네슘의 양에 따라 달라지는 지표이다. 물의 경도가 높으면 인체에 영향을 주어 설사를 일으키거나, 비누의 세정 효과를 저하시키는 문제가 발생한다. 우리나라는 마시는 물을 기준으로 경도를 300mg/L 이하로 설정하고 있으며, 이 기준에 따라 불광천 물의 경도가 적합한 수준인지 측정하고자 한다.

5. 염소 이온

10) 박노태 et.al, 서울대학교 분자미생물학 연구센터, 부영양화의 진행과 그 대책, 72-75pp.

11) 김영환 et.al, 충북대학교 생명과학부 생명과학연구, “하천수의 산성화가 담수 조류에 미치는 영향, 127-129pp.

12) 세종특별자치시, https://www.sejong.go.kr/depart/sub01_040403.do?jsessionid=360D18011B063AB5D4E9FCD97956DD93.portal1, 2023.11.21

자연 상태에서도 보통 30ppm 정도를 함유하고 있지만, 이 이상의 검출은 인간 및 가축의 배설물이나 가정하수 혹은 공장폐수의 유입을 의미하기에 수질 오염의 판단 척도로써 사용된다. 염소 농도가 40ppm 이상이면 심장병 혹은 간질환 환자에게 유해할 수 있는 수치이며, 알칼리성이 낮은 물에서 염소 이온 농도가 높으면 금속을 부식시킬 수 있다.¹³⁾ 이러한 측면에서 불광천의 염소 이온 농도가 적합한 수준인지 실험을 통해 측정하였다.

G. Ansys

Ansys Workbench는 시스템 수준에서 솔루션을 얻기 위해 다물리계 시뮬레이션을 구성하는 포괄적인 플랫폼을 제공한다. 이는 유체의 상호작용을 고려하는 연성 해석을 수행할 수 있으며 유한 요소 모델 (Mesh) 및 CAD 인터페이스 생성 등의 전처리 환경과 여러 분석 기능이 탑재된 후처리 환경이 있다. 현재 대부분의 산업체에서 널리 쓰이고 있는 Ansys fluent는 기본적으로 열 유체해석 소프트웨어지만, 단순히 열 유동 해석뿐만 아니라 난류, 복사열 전달 등의 복잡한 물리 현상을 해석하기 위한 다양한 검증된 수치 모델을 제공하므로, 본 연구의 목적인 불광천 유속 변화를 측정하기에 가장 적절한 프로그램이라고 할 수 있다.¹⁴⁾ 본 연구에서는 돌다리 모양을 썩기형, 사각형, 타원형으로 나누어 모델링하여 각 모델 당 불광천의 유속 변화를 을 파악해야하기 때문에 유체와 관련된 물리현상을 계산할 수 있는 엔지니어링 기법인 Ansys CFD(전산 유체 역학)의 Ansys Fluent를 사용하였다. Ansys Fluent는 복잡한 유체 현상을 시뮬레이션하기에 효과적인 엔지니어링 도구 중 하나이며 해석적인 확장성을 갖추고 있어 본 연구와 같이 불광천의 특이한 돌다리가 있는 지형의 흐름을 이해하는 데 적합한 CFD 해석 소프트웨어이기 때문에 이를 사용하여 연구를 진행하였다.

H. 각 모양별 유속 상승에 대한 기대 효과

협의를 통해 정하게 된 3개의 징검다리 형태는 썩기형, 사각형, 타원형이다. 각 형태에 따른 유속 변화에 대한 기대 효과를 비교하겠다. 첫째로, 사각 형태의 구조물은 세 형태 중 가장 유체의 저항을 많이 받는 형태로 알려져 있으므로, 유속 증가 효과는 가장 부족할 것이다. 즉, 유속이 흘러 나가는 부분에서 징검다리 뒤에 지속적으로 와류가 생겨날 것으로 보인다. 하지만 장기적으로 보면 즉, 마모가 계속되어 모양이 훼손되었을 시에는 가장 안전 사고와 관련된 문제가 적을 것으로 보인다. 썩기 형태는 사각형 형태보다는 유체의 저항을 덜 받는 구조로 알려져있다. 강과 같은 형태에서 물이 흐르는 유동을 개수로 유동(open channel flow)이라고 하며, 이때 항력(D) 는 식(1)과 같은 방식으로 나타내어진다. 이때 A가 개수로의 단면적을 의미하므로 더 작은 면적에서 항력을 덜 받아서 더 빠르게 움직이도록 할 수 있다. 즉 썩기 모양으로 개수로를 좁혀주는 형태에서 유체의 유동속도를 더욱 빠르게 할 수 있다.

13) 성주군,

https://www.sj.go.kr/S1016/page.do?cmd=258&bod_uid=202193&srchDept=&srchEnable=1&pageNo=6&srchSDate=&srchBgpUid=-1&mnu_uid=2527&srchKwd=&srchEDate=&srchColumn=&, 2023.11.21

14) 나혜령, ANSYS Fluent를 활용한 플랜트 설비에서의 CFD 해석 사례, 대한설비공학회 설비저널 44권, vol.11(2015), pp 58-59

$$D = C_d A \frac{\rho V^2}{2} \quad (1) \quad 15)$$

마지막으로 유체의 저항을 가장 덜 받는다고 알려져 있는 타원형 형태로 돌다리를 고안해보았다. 타원형 형태의 구조물은 구조의 특성상 정면과 후면에 모두 와류로 인한 손실이 적고, 유속 차이를 이용하는 비행 기구들의 날개와 같은 형태를 가지고 있다는 것을 감안했을 때 유속 증가 효과도 높다고 한다. 이를 물에 대해 적용한 모양인 hydrofoil을 타원형 돌다리 모양에 사용할 것이다. Performance Analysis of Hydrokinetic Turbine BladeSections(Abdullah Muratoglu)에 따르면, hydrofoil은 위로 볼록한 곡선과 움푹 파인 밑부분이 특징적이다. 윗부분의 볼록함이 아랫부분의 오목함보다 보통 큰 것이 특징이다. hydrofoil의 최대두께와 최소두께, 커브의 반지름(아주 큰 원형이라고 가정할 때)에 따라 다양한 효과를 낼 수 있다. 여러 hydrofoil 모양들 중, 우리가 사용할 모형의 유체 충돌 각도(attack angle)는 0도에 가까울 것이므로, 적은 각도에서 효과가 좋은, NACA 4418을 활용할 것이다. 하지만 모양들이 같은 길이를 가지고 있다 하였을 때 강의 너비를 차지하는 비율이 가장 낮기 때문에 유속 감소 효과가 적을 것으로도 보인다.

타원 형태는 징검다리 전면에서 뺨기 형태보다 에너지 손실이 보다 많이 일어날 것으로 보인다. 반면 징검다리 후면(물살이 좁아졌다가 다시 넓어지는 부분)에서는 물살이 부드럽게 모여면서 와류로 인한 에너지 손실은 보다 적을 것으로 보인다. 모양의 특성상 타 형태보다는 물살의 국소적 방향 변환에 있어서 큰 영향을 받을 것이지만, 시뮬레이션 단계에서 이런 소규모의 변화는 구현하기 어려워 전체적으로 가장 유속이 증가하는 형태일 것이라 예측할 수 있다. 뺨기형태와 집중적으로 비교하고자 한다.

Ⅲ. 연구 방법

A. EM 및 수생생물을 이용한 수질 복구 실험

1. 대조군의 설정

불광천에서 채취한 하천수 100ml에 대해 control로써, 수질검사키트를 이용해 염소, DO, 철분, 질산염, 인산염의 농도를, pH 미터를 이용해 pH를 측정하였다. 증류수 1L에 EM 원액 20 mL를 넣어 희석시켜 2% EM 용액을 만들었다. 이후, 2% EM 용액에 대하여 수질 검사키트를 이용한 DO 측정 및 pH 미터를 이용한 pH 측정을 시행하였다.

2. 실험군의 설정

2% EM 용액 5mL를 불광천 물 200mL에 희석한 뒤 1일차에 해당하는 DO와 pH를 측정했고 이물질이 들어가지 않을 정도로만 입구를 막아 놓은 채로 4일 뒤 두 가지 항목을

15) Abdullah Muratoglu et.al, Performance Analysis of Hydrokinetic Turbine BladeSections(2015), Avestia PublishingAdvances in Renewable Energy, 2~6pp.

각각 다시 측정하였다.

각 수생식물을 불광천물 100ml와 함께 EM용액에 대한 실험에서와 같이 4일간 이물질이 들어가지 않을 정도로만 입구를 막아 놓은 채로 4일 뒤 각 두 가지 항목을 각각 측정하였다.

3. 실험 결과

불광천물 수질 검사 결과는 <표2>와 같았다. 경도는 약 180ppm이었는데, 이를 독일 경도(°dH)로 환산하였으며, 철분과 염화 이온은 검출되지 않았다. 수질 개선에 관한 실험 결과는 <표3>에서 알 수 있듯, DO에서는 *Spirodela spp.*과 *Salvinia spp.*의 DO가 가장 높았다. 이때, 각각 동일하게 약 2ppm에서 약 6ppm으로 3배 가량 증가하였다. 반면, EM 용액은 약 4ppm으로 2배가량 증가하며 2가지의 수생식물보다 낮은 수질정화능력을 보여주었다. 또한 pH의 경우 대조군과 EM 용액을 제외한 대부분의 경우, 0.5이상 감소한 것으로 나타났다.

검사대상/	경도(°dH)	질산염	염화 이온	인산	철분	pH
검사항목		(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	
불광천수 (하천수)	10.1	5	0	3	0	7.3

<표2 불광천수 수질 검사 결과>

검사 항목	검사 대상	1일차	4일차
D.O(ppm)	<i>Spirodela spp.</i>	2(control의 값)	6
	<i>Salvinia spp.</i>	2(control의 값)	6
	EM	2	4
	불광천 하천수(control)	2	2
pH	<i>Spirodela spp.</i>	7.3(control의 값)	6.7
	<i>Salvinia spp.</i>	7.3(control의 값)	6.8
	EM	6.8	6.6
	불광천 하천수(control)	7.3	7.2

<표3 수질 개선 실험 결과>

B. Ansys를 이용한 돌다리 모형에 따른 유속 변화 실험

1. 실험 과정

Ansys Discovery(Ansys 내장 모델링 프로그램)를 통해서 사전 조사한 실제 불광천의 형태 일부를 실제 크기로 재현하였다. 이후 해당 모델링 자체와 각각 타원 형태, 이등변 삼각형 형태(크기가 다른 꼭짓점이 상류를 향하도록 배치) 그리고 직사각형 형태의 징검다리를 설계하여 사전조사에서 가장 유속이 느렸던 부분에 배치하였다. 이때 모두 동일한 개수, 그리고 각각의 징검다리는 동일한 부피를 가지도록 설계를 진행하였다. 이러한 모델을 사용하여 Ansys fluent를 활용했는데, 결과값을 산출하기 위해서 사용한 초기값은 다음과 같다. Meshing 단계에서 1m 기본 셀을 설정하였으며, 이보다 작은 기본 셀을 설정하면 결과값이 보다 정확해지지만 컴퓨터 오류가 발생할 위험이 있어 이러한 크기로 결정하였다. 초기와 최종 유속은 측정된 대로 0.02m/s로 설정하였으며, 수압은 따로 측정하지 않았지만, 불광천의 깊이와 수심당 증가하는 압력을 고려하여서 1.25 atm으로 설정하였다. 난류 모델은 k-omega로, 일반적인 저속의 유체에서 사용하는 모델로 결정하였다. 중력은 9.8m/s²로 설정하였으며, 물의 점성과 밀도, 시멘트의 마찰계수 등은 일반적으로 알려진 값을 사용하였다. 정확한 결과 산출을 위해서 계산을 모델당 200회 반복 실행하도록 설정하였다. 이런 과정을 거쳐 최종적으로 강 모델 전체에서의 압력을 시각화하는 결과를 산출하고, 이를 통해 결론을 도출해 내고자 하였다.

2. 실험 결과

i) 징검다리 설치 전

<그림1>과 같이 처음부터 끝까지 거의 계속 같은 압력을 유지하는 양상을 보인다. 이는 징검다리를 설치한 모델링과 비교군으로 삼기 위해 시뮬레이션 실행을 하였다. 끝에 약간 압력이 달라지는 이유는 원래의 불광천과 달리 시뮬레이션은 닫힌 상태로 존재하기 때문이라고 분석하였다. 또한 아래 시뮬레이션 결과값들과 다르게 압력의 변화가 없어 보이는 이유는 각 색깔이 의미하는 압력의 단위가 크게 잡혀있기 때문이다. 또한 압력의 단위가 크게 설정된 이유는 징검다리가 없어 압력에 큰 변화가 없었기 때문이라고 볼 수 있다.

ii) 사각형 징검다리를 설치했을 때

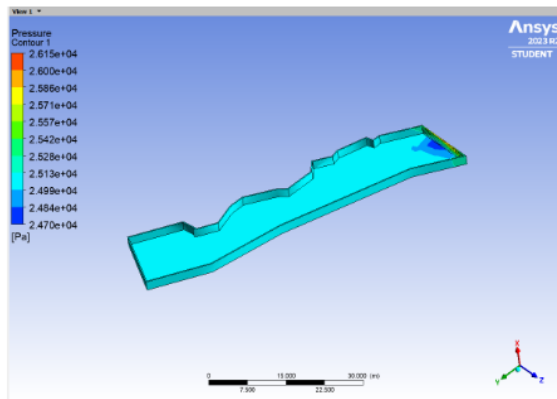
<그림2>와 같이 정사각형 징검다리 전 빨간 부분이 불광천의 시작부분을 의미한다. 징검다리를 통해 흐른 후에 압력이 징검다리를 설치하지 않은 모델보다는 더 오래 지속됨을 관찰할 수 있다. 초록색 부분의 압력이 더 오래 지속됨으로써 천의 물이 흐르지 않고 고이는 현상을 막을 수 있다.

iii) 빼기형 징검다리를 설치했을 때

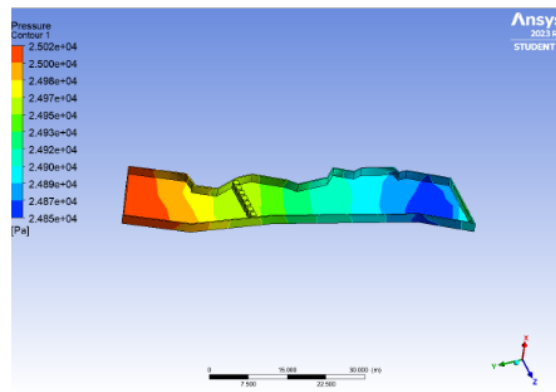
<그림3>과 같이 변화하는 압력의 단위가 0.001 pa로 나타났기에 징검다리로 인한 유속의 변화가 클 것이라고 분석하지 못하였다. 또한 징검다리가 위치한 부분을 보면 국소적인 부분이지만 압력이 0.001 정도 변하는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 전체적인 결과를 분석하자면 돌다리를 통한 유속의 변화는 크지 않을 것으로 보인다.

iv) 타원형 징검다리를 설치했을 때

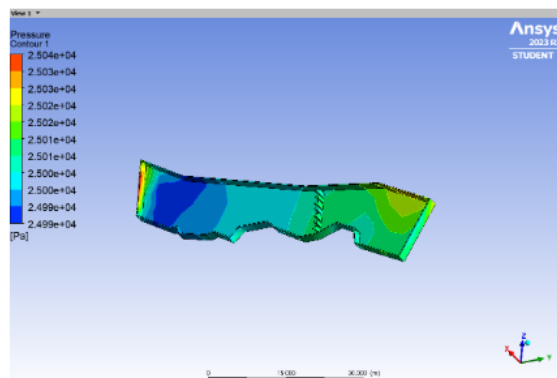
<그림4>와 같이 3가지 모양의 징검다리 중 타원형 징검다리를 설치했을 때 징검다리 주변의 유속이 가장 빠르게 나타난 것을 확인할 수 있다. 타원형 징검다리를 통과하기 전과 통과한 후의 압력 차이는 0.001 Pa 정도이지만 색깔로 분석했을 때 가장 $2.5 \times 10^4 \text{ Pa}$ 의 수압을 가진 면적이 가장 넓은 것을 확인할 수 있다. 따라서 유속을 높이려는 목적을 달성하기 위해서는 징검다리의 모양이 타원형일 때 가장 적합하다고 판단된다.



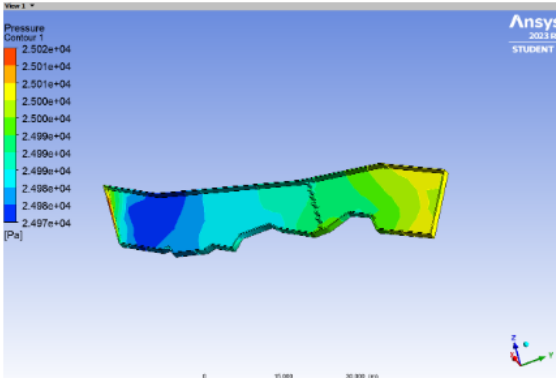
<그림1 | 돌다리가 없을 때의 유속 @임세환>



<그림2 | 직사각형 돌다리의 유속 @임세환>



<그림3 | 썰기형 돌다리의 유속 @임세환>



<그림4 | 타원형 돌다리의 유속 @임세환>

IV. 결과 및 고찰

A. EM 및 수생생물을 이용한 수질 복구 실험의 결과

pH 측정 결과 대조군을 포함한 4가지 경우 전부 pH가 낮아졌다. 하천 생활환경 기준

에 따르면 pH 6.5 이상 7.5 미만은 정상 수준이기 때문에 실험 결과 모두 정상 수준의 pH이지만 특히 EM 용액은 정상 pH의 경계에 도달한 만큼 불광천에 흐르는 물의 양 등 여러 경우를 계산 후 적절한 양의 EM 용액을 사용해야 할 것으로 보인다. 또, 수생식물 중 *Salvinia* spp.의 pH 하락 폭이 가장 작기 때문에 *Salvinia* spp.의 수질 정화 능력이 가장 뛰어난 것으로 판단하였다.

Salvinia spp., *Spirodela* spp.은 우리나라 전역에 분포하고 있는 토종 수초이기 때문에 생태계 교란의 걱정을 하지 않아도 될 것으로 보인다. 이에, 불광천에 현재 분포하는 생태계의 교란 및 파괴의 문제 없이 *Salvinia* spp.와 *Spirodela* spp.를 모두 이용할 수 있을 것으로 예상된다.

불광천수의 경도와 pH가 각각 10.1°dH, 7.3으로 *Salvinia* spp.와 *Spirodela* spp.가 모두 잘 생존할 수 있는 범위 내에 존재하므로, 불광천에는 이들이 생존하기 유리한 환경이다. 그렇기에, 이 두 종의 식물을 불광천에 수질 개선을 목적으로 사용하는 것은 타당하다고 판단하였다. 이들 중 *Salvinia* spp.의 수질 정화 능력이 *Spirodela* spp.에 비해 좋았던 것을 감안하여, *Salvinia* spp.을 상대적으로 많이 살도록 환경을 조성하는 것이 좋아 보인다.

EM 용액은 생태계를 파괴하지 않는 미생물을 활용하기 때문에 실제로 현재도 여러 지구에서 사용되고 있다. 하지만, EM은 약산성으로, 불광천수의 pH를 저하시킬 위험이 있다. 따라서 EM 용액은 단독으로 사용하는 것이 아니라 꼭 EM 원액을 희석한 뒤, 적정량을 넣어 사용하는 것이 불광천수의 pH를 과도하게 저하시키지 않고 수질을 개선하기 가장 적합하다고 판단된다.

정리하면, 불광천에는 pH에 큰 영향을 주지 않을 정도의 EM 희석액과 *Salvinia* spp.와 *Spirodela* spp.를 모두 이용하여 수질을 크게 개선시키고, DO를 늘림으로써, 녹조의 번식 방지에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 보인다.

실험 결과를 통해 수생식물의 수질정화 능력이 EM 용액보다 뛰어나다는 것을 알 수 있다. 하지만, DO가 7.5ppm 이상으로 증가하지 않아 가장 높은 등급인 Ia 등급의 수질 개선이 이루어지지 않았다. 실험에 사용한 수생식물 이외에도 한국수생식물연구회에 따르면 수질정화를 위해 사용되는 수생식물에는 꽃창포, 박하, 이삭물수세미, 큰피막이, 부들, 노랑어리연꽃이 있다. 생태계를 고려하여 이들을 적절히 활용한다면 용존산소량을 높일 수 있어 오염물질 분해를 위한 호기성 미생물들의 개체 수와 활동성 또한 증가할 것으로 판단하였다. 특히, 박하는 pH 중화 능력이 뛰어나 EM 용액으로 인한 하천의 산성화를 방지¹⁶⁾할 수 있을 것으로 생각된다.

B. Ansys를 이용한 돌다리 모형에 따른 유속 변화 실험의 결과

앤시스를 통해 모델링한 결과를 기반으로 가장 효과적인 징검다리 모양인 타원형 모양을 설치하면 유속을 최대한 빨리하여 하천의 악취를 유발하는 원인인 물이 고여 썩는 현상을 예방할 수 있다. 하지만 기대와는 다르게 앤시스를 돌려봤을 때 강물의 압력 변화가 눈에 띄게 나타난 것은 아니었기 때문에 그저 징검다리 설치 하나만으로 유속을 극적으로

16) 식물이 물을 살린다, 기호일보,

2008.07.20, <https://www.kihoilbo.co.kr/news/articleView.html?idxno=300248>, 접속일:2023.11.21

변화시키는 것은 거의 불가능에 가깝다는 판단이 들었다. 따라서 징검다리가 강물의 유속에 변화를 주긴 하지만 그것이 실질적으로 녹조 문제를 해결할 정도로 유의미하지는 않기 때문에 징검다리과 더불어 추가적으로 유속을 높일 수 있는 방법을 고안해야 할 필요성이 있다.

실험 과정에 있어, Ansys 실행과 관련해서는 모델링을 전문적으로 한 것이 아니기 때문에 실제 불광천의 생김새를 유사하게 따라 했다고 해도 한계가 있을 수 있고 실제 강물의 환경도 그대로 모델링에 구현하는데에는 어려움이 있었다.

본 연구가 시뮬레이션을 분석한 결과는 돌다리 부근에서의 유속변화를 중점으로 즉 돌다리 부근에서 압력의 변화가 있는가를 유속이 변화할 수 있는 가능성의 척도로 설정하였다. 그렇게 내린 결론은 돌다리가 설치된 부근에서 압력의 변화와 그 면적이 가장 컸던 타원형이 유속을 변화시킬 수 있는 돌다리의 모형이라는 것이었다. 하지만 그저 물이 가장 잘 흐르는 것이 기준이 된다면 분석한 결과는 달라 질 것이다. 위에 나온 결과들중 진행방향에 따라 압력이 선형적으로 잘 변화한 것은 사각형의 돌다리 일때였다. 따라서 전체적으로 물이 얼마나 잘 흐를 것인가를 기준으로 분석한다면 사각형의 돌다리를 사용했을 때라고 볼 수 있다.

처음 본 연구에서 구현하고자 한 징검다리의 형태는 총 3가지로 유선형, 뿔기형, 사각형이었는데, 그중 하나인 유선형은 Ansys로 구현하는 것에 대한 난이도가 높은 관계로 같은 곡선 형태인 타원 형태로 대체하고자 했다. 유선형은 직접 구현하지 못하겠지만, 형태를 통해 예상 결과를 예측하고자 한다. 유선형과 타원형의 가장 큰 차이점은 징검다리의 뒷부분의 형태에 따른 에너지 손실 차이일 것으로 예상된다. 유선형은 타원 형태와 달리 뒷부분이 오목한 형태로 끝나게 되므로 물살이 비교적 자연스럽게 벌어지게 되고, 앞서 말한 와류로 인한 에너지 손실 또한 더욱 적었을 것이다. 따라서 유선형은 타원형보다 유속이 빨라지는 효과를 얻을 것이라 예상된다.

C. 화학적 개선 방안 조사

1. 청계천의 사례

청계천은 대한민국 서울특별시를 통과하는 하천으로, 옛날부터 중요한 역사적, 문화적 장소로 손꼽히고 있다. 그러나 시간이 지나며 산업화와 도시화로 인해 오염되고 버려진 상태가 되었고, 이에 따라 청계천을 복원하는 프로젝트가 추진되었다. 주요 목표는 청계천 주변을 깨끗하고 아름답게 만들고, 주변 환경을 보호하며 시민들에게 휴식처와 문화적 장소로써 활용할 수 있는 지역을 조성하는 것이다. 또한 위 복원 사업을 분석하는 것을 통해 불광천에는 어떤 것을 도입할 수 있을지 확인할 수 있을 것이다.

가장 중요한 것은 녹조 관리였다. 녹조는 물이 과도하게 질소나 인을 받으면서 발생하는 조류로, 물의 색상과 악취를 유발할 수 있다. 이를 예방하기 위해 물에 질소나 인이 유입되는 경로를 차단하고, 녹조를 관리하는 방법을 연구하였다. 청계천에선 부착형 녹조 관리가 급선무였기에 물속 질소, 인을 흡수할 수 있는 수생식물을 적극적으로 활용하였다. 노란꽃창포, 애기부들, 석창포 등이 그 예시이다. 위 수생식물들을 심어줌으로써 생태계의 영향을 주지 않으면서 녹조를 관리할 수 있었다.¹⁷⁾ 또한 이와 같은 이유로 청계천 복원사업의 가장 관건이 되는 것은 청계천이 항상 일정량의 물이 흐르도록 유지용수를 확보하는

것이다. 일일 공급유량을 98,700톤으로 정하고 청계천복원 구간의 14개 지하철 역사에서 나오는 지하수 약 22,00톤과 한강원수 또는 중랑하수처리장 처리수 약기 1,700톤을 그 공급원으로 하여 수소 이온농도(pH): 6.5-8.5, 생화학적산소요구량(BOD): 5mg/L 이하, 부유물 질량(SS): 10mg/L 이하, DO: 5mg/L 이상, 총질소: 10mg/L 이하, 총인: 1mg/L 이하의 수질기준을 유지하겠다는 계획을 수립하고 진행하였다.¹⁸⁾

2. AOP

AOP는 유기물 및 때로는 무기물을 산화 반응을 통해 수처리 및 폐수 처리에서 제거하기 위한 화학 처리 절차 집합이다. AOP는 유독하거나 분해되기 어려운 물질인 방향족 화합물, 살충제, 석유 성분 및 휘발성 유기 화합물(VOC)과 같은 물질들을 청정하는 데에 특히 유용하다. 오염물질은 미네랄라이제이션(mineralization) 과정을 통해 대부분 물, 이산화탄소 및 염 등 안정된 무기 화합물로 변환된다. AOP의 목표는 화학 오염물질과 독성을 충분히 감소시켜 정화된 폐수를 수질로 다시 공급할 수 있는 수준으로 만드는 것이다. AOP 기술에서 가장 중요한 단계인 OH 라디칼 형성은 철 2가 이온과 과산화수소의 화합물인 펜톤 용액을 이용한 펜톤 산화법이나, 과산화수소와 오존을 함께 사용하게 되는 Peroxone(과산화수소(peroxide) + 오존(ozone)) 공정, 산화제에 자외선을 가하여 OH 라디칼을 형성하는 UV 광분해법 등 여러가지 방법으로 이루어진다. 이때, OH 라디칼의 형성은 AOP에서 필수적인 단계다. 하지만, 이러한 활성산소는 생태계에 잠재적으로 악영향을 미칠 가능성이 높다. 활성 산소는 세포 내에서 DNA, 단백질, 지방 등과 상호작용하며 손상을 일으킬 수 있다. 세포의 기능이 저하되고, 세포 괴사를 유발하기도 한다. 이렇듯 활성 산소로 인한 문제를 산화 스트레스라고 하는데, 산화 스트레스는 심혈관 질환, 신경퇴행성 질환, 염증성 질환, 노화와 관련된 질환 등 각종 질병으로 이어질 위험성을 내포한다. 생태계는 서로 상호작용을 하면서 AOP에서 발생한 활성산소가 확산되는 효과를 가져온다. 즉, 활성 산소가 계속해서 생태계 내에 투입된다면, 광범위하게 확산되면서 인간에게까지 영향을 주고 AOP 기술로 처리된 공간 주변의 생태계가 완전히 망가지는 위험성이 존재하는 것이다. 게다가 AOP는 AOP가 대상으로 하는 오염물질 외에도 미생물 등 주변 환경에 영향을 미친다. 따라서, AOP는 녹조 제거를 위한 적절한 방안이 될 수 없다.¹⁹⁾

참고 문헌

1. What causes and algae bloom? ,

<https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/air-land-water/water/water-q>

17) "한국법제연구원(KLRI). (2008). 국토 생태계복원 관련 법제 정비방안 연구 생태계 복원의 의의와 전망. <https://www.klri.re.kr:9443/bitstream/2017.oak/4025/1/45089.pdf>

18) "서울특별시, '청계천 복원 소개 페이지.' 서울특별시웹사이트. https://www.sisul.or.kr/open_content/cheonggye/intro/restoration.jsp

19) American water chemical, <https://www.membranechemicals.com/water-treatment/advanced-oxidation-plants/>, 2023.11.21.

uality/algae-watch/what-are-algae/causes-of-an-algae-bloom, 2023.11.21

2. Dissolved oxygen,

<https://www.epa.gov/caddis-vol2/dissolved-oxygen#:~:text=Water%20also%20absorbs%20oxygen%20released,DO%20as%20a%20candidate%20cause>, 2023.11.21

3. 한국환경공학회지, (1995) *Salvinia* spp.를 이용한 영양물질의 제거방안 연구, 안윤주 외. 3-4pp.

4. Duckweed care & control guide, <https://nextaquarium.com/duckweed/>, 2023.11.21

5. Amazon Frogbit - How to Grow and Care for Amazon Frogbit, <https://aquariumtidings.com/amazon-frogbit-care/#:~:text=Water%20Conditions%3A%206.0,care%20for%2C%20floating%20aquarium%20plant>, 2023.11.21

6. Bubbleband, <https://bubblebank.net/m/product.html?branduid=789>, 2023.11.21

7. 대한건강의료지원단, https://khms.or.kr/healthy_life/ecofriendly_life/em_life/em, 2023.11.21

8. 종합수질검사키트, <https://www.biozoa.co.kr/goods/view?no=604>, 2023.11.21

9. 칠곡군 홈페이지, <https://www.chilgok.go.kr/portal/contents.do?mId=1107010100>, 2023.11.21

10. 광노태 et.al, 서울대학교 분자미생물학 연구센터, 부영양화의 진행과 그 대책, 72-75pp.

11. 김영환 et.al, 충북대학교 생명과학부 생명과학연구, “하천수의 산성화가 담수 조류에 미치는 영향, 127-129pp.

12. 세종특별자치시,

https://www.sejong.go.kr/depart/sub01_040403.do;jsessionid=360D18011B063AB5D4E9FCD97956DD93.portal1, 2023.11.21

13. 성주군,

https://www.sj.go.kr/S1016/page.do?cmd=258&bod_uid=202193&srchDept=&srchEnable=1&pageNo=6&srchSDate=&srchBgpUid=-1&mnu_uid=2527&srchKwd=&srchE

Date=&srchColumn=&, 2023.11.21

14. 나혜령, ANSYS Fluent를 활용한 플랜트 설비에서의 CFD 해석 사례, 대한설비공학회 설비저널 44권, vol.11(2015), pp 58-59

15. Abdullah Muratoglu et.al, Performance Analysis of Hydrokinetic Turbine BladeSections(2015), Avestia PublishingAdvances in Renewable Energy, 2~6pp.

16.식물이 물을 살린다, 기호일보,
2008.07.20,<https://www.kihoilbo.co.kr/news/articleView.html?idxno=300248>, 접속
일: 2023.11.21

17. "한국법제연구원(KLRI). (2008).국토 생태계복원 관련 법제 정비방안 연구 생태계 복
원의 의의와 전망.
<https://www.klri.re.kr:9443/bitstream/2017.oak/4025/1/45089.pdf>"

18. "서울특별시,'청계천 복원 소개 페이지.' 서울특별시웹사이트.
https://www.sisul.or.kr/open_content/cheonggye/intro/restoration.jsp

19. American water chemical,
<https://www.membranechemicals.com/water-treatment/advanced-oxidation-plants/>, 2023.11.21