

에너지 절약형 자동 컨트롤 수질 정화 장치 개발

< 전남대학교 김태영 >

I. 연구의 목적 및 필요성

- 지구온난화와 기후변화로 인해 안정적인 용수확보가 더욱 민감한 문제로 떠오르고 있으며, 우리나라 연평균 강수량은 1천 245mm로 세계 평균 강수량 880mm보다 약 1.4배 높지만 계절적인 강수량의 편차가 심해 물 부족 국가로 분류됨.
- 우리나라 하천의 특성은 길이가 짧고 경사가 커서 유출이 빨리 일어나며, 증발산량과 유출량을 제외한 강수량의 이용률은 약 26% 임.
- 이중 농업용수의 이용률은 국가 수자원 총량의 12%, 수자원 이용량의 62%를 차지함. 따라서 안정적인 농업용수를 확보하기 위해 폐쇄유역인 댐, 저수지, 하구연 등을 설치 운영하고 있음.
- 각종 저류시설의 증대에 의해 국내 수계는 물리적으로 영양염류의 축적 및 조류증식이 용이한 정체수역으로 변모 함.
- 댐들은 수계에 병렬구조로 축조되어 댐과 댐 사이의 구간 역시 갈수기에는 정체되어 현재 국내의 대형수계는 전체적인 정체화 현상을 빚고 있음.
- 물의 정체에 따른 체류시간의 증가, 인구증가와 도시화, 농업 집약화, 축산과 양식업의 팽창, 공단의 집단화, 친수활동에 따른 수변 요식업소의 증가 등으로 인해 폐하수의 배출, 비료와 사료의 투여 등 오염행위가 양적, 질적으로 증가

함은 물론 지역적으로 집중화 됨.

- 그 결과 영양염류 부하량이 증대하여 최근 국내 담수계는 부영양화에 따른 생태계 및 이수상의 각종 장애가 빈발하고 있음.
- 농업용 저수지는 홍수기 외에는 물의 수직순환이 억제되어 심층의 산소고갈이 더욱 심하게 나타나 남.
- 최근에는 한강과 영산강을 비롯한 4대강에서 물이 녹색으로 변하는 녹조현상이 나타나 식수원 오염에 대한 우려가 확산되고 있음.



<깨끗한 영산강과 녹조가 발생한 영산강>

- 2011년 폐쇄유역 수질측정망(825개소) 조사에 따르면 13.8%인 114개소가 수질기준을 초과한 것으로 나타났는데 주로 수심이 얕고 저수량이 적은 소규모 저수지가 다수였으며, 조류발생에 의한 녹조현상이 빈번이 발생 함.
- 오염물질 중 질소화합물 및 인산염 등을 포함하는 영양염류는 유기물 분해를 일으키는 미생물의 생육과 증식을 도모하기 때문에 담수에 부영양화 현상을 일으키게 됨.
- 부영양화란 미생물에 의한 유기물의 분해로 인하여 담수에 질소나 인 등의 영양 물질이 많아져서 조류의 이상증식이 일어나는 현상 임.
- 이러한 부영양화는 담수의 탁도를 증가시키고 부패물에 의한 악취를 발생시키며, 심할 경우 수중의 어류를 집단 폐사시키는 등 호소의 생태계를 파괴하는

심각한 피해를 발생시킴.

- 특히 물의 흐름이 거의 없이 정체되어 있는 폐쇄성 수역의 하부층에는 산소가 공급되지 않아 바닥에서부터 물의 오염이 심해지게 됨.
- 따라서 폐쇄성 수역에는 수중생태계에 포함된 질소나 인 등의 영양물질의 양이 자체 정화능력을 초과하지 않도록 균형을 유지시키는 것이 중요함.
- 특히 하부층에 있는 물의 용존산소를 높여서 가라앉은 유기물이나 무기물 등의 정화작용이 원활하게 이루어지도록 하는 것이 매우 중요함.
- 이러한 수질오염 문제를 해결하기 위해 농어촌공사, 수자원공사, 국토해양부 등에서는 주기적인 준설작업, 분수, 펌프, 수차, 인공식물섬, 화학약품살포, 에어포기 등과 같은 방법으로 수질정화를 시도하고 있으나 비용이 많이 들고, 효과가 일시적이거나 생태계에 영향을 미치는 등 여러 가지 문제가 발생하고 있음.
- 선박을 이용해 수중의 퇴적물을 제거하는 수중준설은 상시준설이 가능하고 저수지 전역에서 준설작업을 할 수 있으나, 육상준설에 비해 비용이 높고 효율이 낮으며, 오탁수 발생으로 수중생태계 교란이 발생할 수 있음.



<인공 식물섬>



<인공 습지>



<육상준설>



<해상준설>

- 웨이브를 이용한 물 순환 장치는 정체 및 폐쇄수역 등의 용존 산소량이 적은 심층수를 표층으로 이송시켜 수표면에는 Near Laminar Flow를 형성시키고 용존산소가 높은 표층수를 대기압에 의해 심층부로 하강시켜 수중에 산소를 공급하고 혐기화된 저질층의 호기화를 유도하여 중금속, 영양염류의 용출을 제어함으로써 조류를 저감시키는 물리적인 물 순환 기술임.
- 따라서 본 연구에서는 기존 수질정화 방법에 비하여 경제적인 뿐만 아니라 친환경적인 에너지 절약형 웨이브 시스템을 이용한 폐쇄수역의 물 정화 시스템을 개발하고자 함.
- 본 연구에서 개발하고자하는 웨이브는 폐쇄수역의 수면에서 날개를 천천히 회전시켜 순환류를 형성하고 이 순환류에 의해 폐쇄수역의 저변 및 전체 물에 산소를 공급하여 물을 정화시키는 방법으로 작은 에너지로 큰 효과를 발휘하는 시스템임.
- 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)기술은 다상 유동현상에 대한 수치적 모델들을 이용하여 공정상의 상세한 유동구조, 역학적 특성 등의 현상을 해석할 수 있는 system으로 본 연구에서는 CFD를 이용하여 물의 순환에 영향을 주는 웨이브의 최적 조건을 도출 함.

II. 연구의 내용 및 범위

- 본 연구에서 개발하고자하는 에너지 절약형 자동컨트롤 웨이브는 폐쇄구역의 수면에서 날개를 천천히 회전시켜 순환류를 형성하고 이 순환류에 의해 폐쇄구역의 저변 및 전체 물에 산소를 공급하여 물을 정화시키는 방법으로 작은 에너지로 큰 효과를 발휘하는 친환경 시스템임.
- 본 연구에서 개발하고자 하는 웨이브는 힘에 의존하는 유체역학의 단점을 극복한 차원이 다른 웨이브 시스템 임.
- 또한 수심에 따른 온도와 용존산소 등을 센싱하여 설정 값과 측정 값을 비교하여 자동으로 웨이브 시스템을 on/off 시키는 에너지 절약형 시스템 임.
- 정화 대상 구역의 평균수심 [m]과 사용할 웨이브의 경수량 [m^3/min]에 따른 수질정화 유효 구역면적 [m^2] 산출 함.
- Wave system 개발
 - 감속기 회전수 : 10rpm 이하
 - 날개회전직경 : 1200mm
 - 영향수심 : 5m 이하
 - 순환수량 : 25 ton/min
 - 정화면적 : 날개 회전 직경의 25-30배
- Wave system의 크기와 형상에 대한 설계
 - 모형 수조에서 날개모양이나 크기, 각도 등에 따른 물의 순환량 조사
 - 모형 수조에서의 수질분석 (온도, DO, 생태환경 등)
- CFD (Computational Fluid Dynamics)을 통한 유동해석
전산유체역학(CFD) 기술은 유체, 열전달, 연소, 화학반응 및 다상유동현상에 대한 수 모델들을 이용하여 공정상의 상세한 유동구조, 역학적 특성 등의 현상을 해석할 수 있는 system으로 본 연구에서는 CFD를 이용하여 물의 순환에 영향을 주는 웨이브의 최적 조건을 도출함.
- 정체된 폐쇄구역의 경우 수심 1.5m에서 용존산소는 물 표면의 약 50 % 이하 임. 현장 설치 후 수심 1.5m에서 표면의 용존 산소 80% 이상을 목표로 함.
- 웨이브를 이용한 폐쇄구역의 수질정화 시스템 시제품 제작 및 설치운영.

III. 연구결과

- 웨이브 시스템의 에너지 절약효과는 물갈퀴 날개의 길이인 R의 4승에 비례함. 물결이 미치는 수심은 R에 비례하고 활성화 면적은 R의 2승으로 넓어짐.
- 블레이드의 날개 면적이 동일할 때 형상을 직사각형으로 하여 10 rpm의 각속도를 주어 전산해석을 시행한 결과 블레이드가 정지 상태에서는 수면의 유동이 없으며, 블레이드 가동 초기에는 웨이브에 의한 수저의 물이 서서히 움직이기 시작하다가 본격적인 유동단계에서는 수저의 물이 용출되어 순환됨.
- rpm과 블레이드의 직경이 증가할수록 물의 순환속도는 증가하였으며, 동일한 블레이드 직경에서는 블레이드 날개 하단에 tap를 설치한 블레이드에서 물의 순환속도가 약 1.3배 정도 증가함.
- 웨이브 시스템을 설치하지 않은 수조에서 물의 표면 온도변화는 초기 36.4 °C에서 3시간 후에는 자연대류에 의해 26.9 °C로 감소함. 그러나 수조의 중층에서는 약 1.5 °C의 온도가 증가하였으며, 하층에서는 거의 온도변화가 없었음. 실험실 규모의 수조에서 자연대류에 의한 수직온도변화는 수조의 하층까지 전달하지 못함.
- 블레이드 날개 길이가 7 cm인 웨이브 시스템을 이용할 경우 수조의 상부 온도는 17분 만에 강제대류에 의한 급속한 물질전달로 약 25 °C로 하부층과 평형에 도달함. 수조의 중부 영역에서는 5분 이내에 상부층과 같은 온도를 나타냄. 웨이브 시스템을 이용하지 않을 경우와 비교하여 볼 때 수조의 온도가 평형에 도달하는 물질전달 시간은 약 10배 정도 빠름.
- 웨이브 시스템을 설치하지 않은 수조에서 물의 표면 DO 변화는 초기 4.24 ppm에서 3시간 후에는 3.75 ppm로 감소함. 수조내의 중부와 하부층도 역시 시간에 따라 DO는 감소하였으며, 3시간 이내에 수조 전체에서 DO는 평형에 도달하지 않았다.
- 블레이드 날개 길이가 14 cm인 웨이브 시스템을 이용할 경우 수조의 상부에서는 초기 DO가 약 4.03 ppm에서 7분 후에는 4.17 ppm로 증가하였으며, 특히 1분 후에는 4.52 ppm으로 약 1.12배 증가함. 이러한 이유는 블레이드의 교반에 의한 중부층과 하부층의 높은 농도의 DO가 물질전달에 의해 상부층으로 전달되었기 때문임. 수조내의 중부층과 하부층의 DO는 시간에 따라서 점진적으로 감소하다가 반응 7분 후에는 거의 평형에 도달함.

- Non-control 웨이브 시스템에서 날개의 회전수가 40rpm에서 30과 20rpm으로 감소함에 따라 에너지 소비율은 약 12.5% 및 30.4%로 감소 함.
- Auto-control 웨이브 시스템에서 날개의 회전수가 40rpm에서 30과 20rpm으로 감소함에 따라 에너지 소비율은 약 5.134% 및 18.6%로 감소 함.
- Non-control 웨이브 시스템과 온도 control 웨이브 시스템에서 날개의 회전수가 20rpm일 때 전력사용량은 각각 1293.9 W와 601.1W로 약 53.5%의 에너지 절감 효과를 나타내었으며, 30rpm일 때는 57.1% 그리고 40rpm에서는 60.3%의 에너지 절감효과를 나타 냄.
- Non-control 웨이브 시스템에서 브레이드의 rpm과 전력소모량과의 상관관계는 $Y = 28.32X + 745.9$ 이었으며, auto-control 웨이브 시스템에서 브레이드의 rpm과 전력소모량과의 상관관계는 $Y = 6.875X + 437$ 이었다.
- 녹조균인 *microcystis aeruginosa*의 성장곡선은 배양 후 2일에서 최대농도를 보였으며, 빛이 없는 항온(30°C)보다는 자연 상태에서 배양한 균의 농도가 더 높았음.
- Non-웨이브 시스템을 이용한 감돈제 저수지의 녹조균 저감 실험에서 초기 수질의 농도는 UV-spectrophometer (740nm)의 흡광도가 0.0143에서 2일 후에는 약 0.0537로 수질이 악화 됨.
- 웨이브 시스템을 이용한 감돈제 저수지의 녹조균 저감 실험에서 초기 수질의 농도는 UV-spectrophometer (740nm)의 흡광도가 0.0485에서 2일 후에는 약 0.0461로 수질이 약간 개선 됨.
- 초음파의 진폭변화에 따른 *microcystis aeruginosa*의 사멸은 진폭이 20%일 때 반응시간 5분 후의 *microcystis*의 생존율은 43%이었으며, 진폭이 50%일 때는 약 30%, 그리고 진폭이 100%일 때는 11%의 생존율을 나타냄.
- 초음파를 이용한 *microcystis aeruginosa*의 사멸은 초음파의 진폭이 증가함에 따라 사멸율도 증가하였으며, 진폭이 100%일 때 반응 10분 후 *microcystis*은 모두 세포벽 파괴에 의해 사멸되었다.

IV. 연구결과의 활용계획

○ 기술적 측면

- 수생태 복원 기술의 발전으로 환경기반 기술 확보
- 소규모 수계의 복원 및 보존관리에 응용, 첨단 환경기술 개발로 환경산업의 선진화. 환경기술의 수출을 통한 고부가가치의 지적 재산권 확보 및 실용기술로서의 경쟁력 확보
- 환경 산업의 활성화로 산업인력 고용확대 효과, 환경산업기술의 최첨단화 유도. 기술 집약형 고부가가치화 기반 정립 및 기대 내실강화
- 개발제품의 조립기술 분석 결과를 적용한 향후 양산 시스템 구축을 통한 우수한 생산기술 확립
- 신재생에너지를 활용한 전력 시스템을 갖추고 있어, 우수 기술 융합을 통한 제품시장 진출. 체계적인 연구 및 공학적 설계 접근과 시험평가에 의한 우수 성능의 제품기술 확보
- 개발 제품의 미적 설계 적용과, 친환경 기술 홍보를 활용한 수요자 층으로부터 지대한 기술 관심 고조
- 타사 대비 경쟁력을 확보하기 위해 필요한 분업화, 전문화가 집적화를 추진할 계획이며, 다양한 인프라 활용과 전문기관 지원을 통하여 기술 및 시장경쟁력 확보, 활발한 기술 네트워크 구축

○ 사회적 측면

- 댐, 저수지의 생태공학적 수질회복, 상수원 확보 및 수질 개선에 활용
- 협소한 국내 산업의 확장, 타산업간의 균형발전, 고부가 가치화와 경쟁력 강화로 세계시장 진출에 기여
- 체계적인 생산 공정 관리 기반구축을 통한 업체 제조원가 절감, 품질 및 생산성 향상, 해외시장 경쟁력 강화
- 국내 공급환경 즉 기술, 생산업체, 인프라, 마케팅 등의 종합적인 필요조건을 사전 정비 구축하고, 특히 국내시장 점유율 확보, 보급화 제품 공급으로 인해 내수 강화, 수입대체 및 수출시장 개척 가능
- 제품 설계, 제작, 공정 분야의 산업 활성화와 기타 구성품의 수입 대체로 국내 수요는 물론 수출증대에 기여
- 새로운 수요 창출에 의한 관련 기술 인력의 고용율 향상 및 전문 인력의 수급을 향상
- 태양광 발전시스템의 물순환 장치와 유기적 연동에 의한 새로운 부품산업 활성화
- 개발기술의 산업화, 지식기반의 고부가가치 산업의 개발, 사업화 등을 통하여 새로운 분야로의 시장 확대

- 국제 및 국내 기후변화, 환경대응을 위한 기술제품으로 Blue Market 형성

○ 경제적 측면

- 녹조 발생에 신속하게 대처로 수자원 보호 및 연계산업 수익 안정
- Impeller 분야의 설계, 구조, 생산설계 요소기술 교육 및 해당 분야 설계 전문 인력양성 및 산업체 인력 재교육
- 물순환 구성 기자재산업, 기계부품산업, 통신산업 등 산업에 따른 유효인력 흡수 및 고용 유연성 증대에 기여
- 제품 설계, 제작기술 전문가 양성으로 지역산업의 인적인프라 구축, 양성된 신규인력을 대기업이 아닌 지역 중소기업으로 취업되도록 유도, 우수인재 역외 유출 방지
- 친환경 중소기업 핵심기술을 확보하고 있는 전문 중소기업을 발굴·육성하여 중소기업의 새로운 활로모색의 계기 마련
- 환경 정화 기술과 태양광 에너지 활용으로 기술경쟁력을 갖추어 국내외 긍정적 경제 파급효과
- 국내외 시장 진출과 매출증대에 따른 기업에 대한 추가적 투자유치 유도
- 점차 전남지역은 물론 전국적으로 활용도가 높아지고, 시장성이 증대됨에 따라 추가 연구개발 기술도출이 예상되어 연계사업이 가능함에 따라 수요 투자 유발
- 지역의 관련 기술의 우수성 인정으로 연계적 연구활동에 대한 기술신뢰성 확보로 기업의 투자유지 조건에서 우수성 확보