인공 해수수로 내 흐름 특성과 조류 생성의 상관성 연구

Correlation Analysis between Hydraulic Characteristics and Algal bloom in an Artificial Seawater Channel

여창건*, 정석일**, 이승오***, 김문일***

Chang Geon Yeo, Suk Il Jeong, Seung Oh Lee, Moon il Kim

요 지

해수를 이용한 세계최초의 해수수로인 송도 신도시 중앙공원 해수수로는 서해안에서 집수된 해수를 5μm의 공극 크기를 가지는 해수처리시설 (STF, seawater treatment facility)에 의해 여과된 뒤 2곳의 해수공급 지점에서 해수수로로 공급된다. 여과된 해수는 수로로 155L/sec의 유량으로 1.8km를 흐른 뒤 서해로 방류된다. 이러한 인공 해수수로에서는 흐름정체에 따른 수질 문제와 영양염에 의한 적조를 유발하는 조류 성장이 문제가 된다. 따라서 본 연구에서는 3차원 수치모형을 이용한 인공 해수수로내의 흐름특성 모의와 수질 모니터링의 통한 조류 생성 특성 및 장소를 비교하여 그 상관성을 분석하고자 한다.

수치모의 실험은 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 이용하였으며, 격자망 형태는 직사각형 직각 격자가 사용되었다. 현장 모니터링을 통하여 획득한 수질 데이터와 비교 분석을 통하여 해수수로 내 해수 흐름 특성변화(유속, 와도 등)와 조류생성에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 해수 수로내의 평균 유속은 0.01m/s 이었으며, 수로의 형상에 따라서 정체수역이 발생하였다. 이러한 정체수역은 현장 모니터링을 통하여 예측된 조류 발생 지역과 일치하였다. 이러한 흐름 특성과 조류생성과의 상관성 규명을 통하여 인공수로의 물순환 시스템 설계시 조류 생성을 억제할 수 있는 최적 관리를 위한 설계의 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : FLOW-3D, 인공해수수로, 정체수역, 조류생성

1. 서 론

송도 신도시 중앙공원에는 해수를 이용한 세계최초의 해수수로가 건설되었다. 이 해수수로에는 서해안 인근의 일정 수심에서 집수된 해수를 5μm의 공극 크기를 가지는 해수처리시설 (STF, seawater treatment facility)에 의해 여과된 뒤 2곳의 해수공급 지점에서 해수수로로 공급된다. 여과된 해수는 수로로 155L/sec의 유량이 1.8km를 흐른 뒤 서해로 유출된다. 이러한 인공 해수수로에서는 흐름정체에 따른 수질 문제와 영양염에 의한 적조를 유발하는 조류 성장이 문제가 된다. 해수수로에서의 영양염 균형은 적조를 유발하는 조류 성장을 방지하고 제어하는데 매우 중요하다.

해수수로 기본설계에 낮은 유속으로 인한 해수수로에서의 조류 성장은 전혀 고려되지 않았으며 수질 악화 또한 고려되지 않았다. 따라서, 해수수로의 수질은 자연상태에서의 생태계 형성단계에 따른 식생 변화에 따라 달라질 것으로 판단되며 생태계 형성과 그 단계는 반드시 평가되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 3차원 수치모형을 이용한 인공 해수수로내의 흐름특성 모의와 수질 모니

* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : gun1230@empal.com
** 비회원 · 홍익대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : j98087085@nate.com
*** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 조교수 · E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr(교신저자)
**** 정회원 · 한양대학교 건설환경시스템공학과 조교수 · E-mail : moonilkim@hanyang.ac.kr

터링의 통한 조류 생성 특성 및 장소를 비교하여 그 상관성을 분석하고자 한다.

2. 기본 이론

2.1 조류의 성장

조류는 수중의 탄산가스 및 기타 유기염류를 섭취하며, 빛에너지를 흡수하여 생활하는 생물로서 빛이 없는 지하에서 번식하는 경우는 없으나, 지하수가 흐르는 경우 이에 포함되어 있는 풍부한 탄산가스와 무기염류를 영양원으로 하여 빛 아래에서 번식을 하기도 한다. 일반 하천과 달리 흐름이 정체된 수역에서는 영양염류, 수온, 일사량 등의 적절한 환경조건이 형성되면 조류 발생이 급격히 증가하게 된다.(조류는 30일 이상 체류하는 호소의 정체수역에서 주로 발생하며, 수계로 유입되는 질산염이나 인산염의 과영양 상태와 25~30℃의 높은 수온이 유지될 때 활발한 성쟁속도로 광범위하게 생성된다. 인은 수심이 50m 이상되는 호소에서 입자와 함께 침전되어 영구히 고정되는 특성이 있으나. 수심이 얕은 호소에서는 상층과 하층이 뒤섞여 호소 내부적인 인의 부하가 높아져 조류 발생에 영향을 미치기도 한다.

송도 해수수로에서는 1~5μm 크기의 식물성플랑크톤 또는 미세조류가 해수처리시설 (STF, seawater treatment facility)에 의해서는 제거되지 못하며 이러한 입자상 물질들은 10일의 교체주기 (155L/sec)로 운전되는 해수수로 내부에 퇴적될 수 있다. 해수처리시설 (STF, seawater treatment facility)에서 제거되지 않고 해수와 함께 해수수로로 유입된 입자상 물질은 수로의 사영역에 퇴적하여 장기적인 측면에서의 COD와 TN 및 TP농도를 증가시키는 주요 원인이 된다. 또한 송도 중앙공원에 이식된 초목 뿌리가 착생하는 데 도움을 주기 위해 사용한 조경토가 폭우로 인해 씻겨 해수수로로 유입될 경우 해수수로의 유기물과 영양염 (유기질소 및 유기인) 과잉 공급원이 될 수 있다. 또한 해수수로의 얕은 수심 (1.5m)은 햇빛 투과율이 높아 식물성 플랑크톤이 광합성에 필요한 충분한 햇빛을 얻을 수 있으므로 조류 성장의 제한인자는 되지 않는다. 식물성 플랑크톤이 이용할 수 있는 햇빛은 성장율에 직접적으로 영향을 미친다. 식물성 플랑크톤은 이산화탄소 (CO2)와 햇빛 (에너지)을 이용하여 유기물과 새로운 세포를 만든다. 또한 미생물 성장율은 온도 증가에 비례하여 증가한다. 조류 대 증식은 햇빛이 충분하고 영양염이 충분한 조건하의 최대 성장율 조건에서 발생된다. 미생물 증식에 좋은 온도는 여름과 가을철이며 게릴라성 폭우와 강우 등과 같은 비점오염원으로부터 과잉으로 공급되는 영양염을 이용하여 비가 그친 뒤 바로 조류 대증식이 발생할 수 있다. 조류제어 대책으로는 수중폭기, 호소내 인의 침전, 인의 유입 차단, 약품주입에 의한 조류의 사멸 등이 있다.

2.2 FLOW-3D 모형

본 연구에서 사용된 FLOW-3D 모형은 미국 Flow Science사에서 개발한 상용 수치해석모형으로 연속방정식과 운동량 방정식을 지배방정식으로 사용하고 있으며 지배방정식인 연속방정식은 다음과 같다 (Flow Science, 2003).

$$V_F\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z)=0 \quad (1)$$

여기서 V_F는 유체의 요소체적, ρ는 유체의 밀도, u,v,w는 각 방향의 유속, A_x, A_y, A_z는 각 방향 요소면적이다. 운동량 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 다음 식(2) ~ (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial y}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+G_x+f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial v}{\partial x}+vA_y\frac{\partial v}{\partial y}+wA_z\frac{\partial v}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+G_y+f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial w}{\partial x}+vA_y\frac{\partial w}{\partial y}+wA_z\frac{\partial w}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+G_z+f_z \quad (4)$$

여기서 G는 체적력이고 f는 점성력을 나타낸다. 자유표면의 해석을 위한 한 격자 내의 단위체적당 유체의 체적은 VOF(Volume of Fluid)함수, F(x, y, z, t)로 표현되며, 식(5)는 일반적인 VOF함수를 나타낸다.

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\left\{\frac{\partial}{\partial x}(Fu)+\frac{\partial}{\partial y}(Fv)+\frac{\partial}{\partial z}(Fw)\right\}=FDIF+FSOR \quad (5)$$

여기서 FDIF는 Diffusion of Fluid Fraction이고, FSOR은 Fluid Source와 Sink이다.

3. 수치모의 적용

본 연구에서는 해수수로내 흐름 특성변화를 분석하기 위하여 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 이용하였다. 격자망 형태는 직사각형 직각 격자가 사용되었다. 현장 모니터링을 통하여 획득한 수질 데이터와 비교 분석을 통하여 해수수로 내 해수 흐름 특성변화(유속, 와도)와 조류생성에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

3.1 경계조건 및 입력자료

수치모의 수행을 위한 FLOW-3D의 격자망은 총 285,000개의 직육면체형 격자를 사용하였고 전체 해수수로내 흐름특성을 효과적으로 모의하기 위하여 전체를 12개의 블록으로 분할하였다. 수로내 와류와 전체 유동장의 난류 모의를 위하여 복잡한 지형지물이 있는 경우에 많이 활용되는 LES(Large Eddy Simulation) 난류 모델을 적용하였다. 모의대상 해수수로의 총 길이는 1.8km이고 최대 폭은 110m이다. 해수처리시설 (STF, seawater treatment facility)에서 처리되어 수로내로 유입되는 해수의 유입 유량은 전체 수로에 대하여 10일 교체 주기인 155L/sec의 유량이 2곳의 유입구(Boat House와 Anapji)로부터 24시간 유입되며, 초기 수심은 1.5m로 설정하였다. 수치모의에 적용된 수로의 제원과 경계조건은 표 1과 같다.

표 1. 수치모의 적용 수로의 제원 및 실험 조건

수로 길이(m)	수로 폭(m)	수심(m)	유입유량	
			10순환주기	5일순환주기
1,800	110	1.5	155 l/s	283 l/s

3.2 수치모의 결과

수치모의 결과 해수 수로내의 유속은 유입구 지역을 제외하고 수로의 대부분의 지역에서 0.01m/s 이하인 미세한 흐름이 발생하였다. 이는 유입유량이 수로의 전체 면적과 비교하여 상대적으로 매우 작기 때문에 유입유량에 의한 영향은 유입 위어 근처에서만 발생하고 있음을 알 수 있다. 2곳의 유입구를 통하여 유입된 해수는 수로 중앙 호수부에서 합류되며 이곳에서는 단면 확대로 인하여 유속이 감소하여 흐름이 거의 정체되었다. 안압지 부근 유입구를 통하여 유입된 해수는 수로 중앙 호수부에 합류 되기위하여 암거를 통과하며 이때 암거에 의한 단면의 축소로 일시적으

로 유속이 증가하였다가 암거를 나온 해수는 전면부 섬에 의해 흐름이 정체되었다. 호수를 통과한 해수는 단면의 축소로 유속이 증가하였다. 굴절부 외측에서 사수역이 일부 발생하였으며, 수로의 단면 확대되는 곳에서는 유속이 감소하여 사수역이 일부 발생한다.

사수역 (dead zone)의 발생, 흐름의 정체는 수로 전체에 대하여 반드시 고려 되어야 할 것이며, 이는 부유사를 포함하여 생물학적 문제를 야기시킬 수도 있다. 사수역은 조류의 번식과 부착 조류군과 같은 심각한 수질 문제를 야기하므로 수로에서의 사수역을 파악하고 이를 감소하기 위한 방안을 강구하여 최적의 생태환경을 유지하는 것이 중요하다.

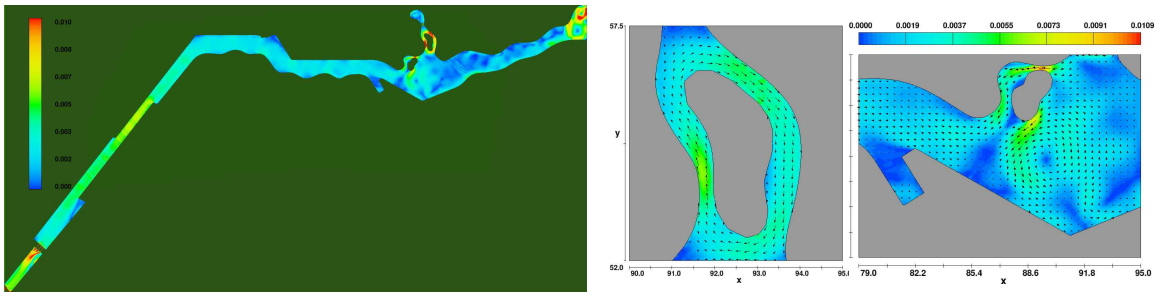
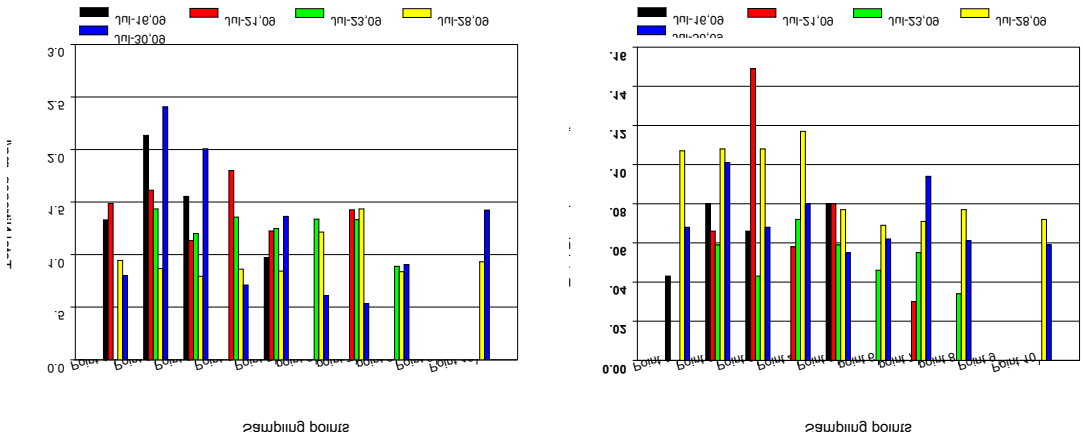


그림 1. 해수 수로내 유속분포

3. 조류발생 예상지역 검토

해수 수로내 조류발생 예상지역 검토를 위하여 그림 3에 나타난 각 측점별 총 질소량과 총 인량(TP)의 변화를 모니터링 하였다. 측점 1~4는 해수처리시설의 각 단계에서 측정한 값이며 측점 5~10은 해수수로내 주요 지점별 측정 값이다. 측정결과 해수처리시설을 통과하여 수로내 중에서 해수 수로의 안압지(point 7)에서 총질소와 총 인량(TP)이 가장 높게 측정되었다. 7월28일의 경우 집중 호우가 끝난 뒤 안압지(point 7)에서의 총질소(TN)농도가 해수원수보다 높았으며 이는 7월30일에는 해수수로의 총질소(TN) 농도가 해수원수보다 낮은 농도로 회복된 것으로 보아 집중호우로 중앙공원에서 유실된 조경토에 함유되어 있는 영양염에 의한 것으로 판단된다. 이곳은 정체수역이 형성되는 곳으로 현장 모니터링 결과 스컴 발생과 가시파래 증식이 가장 활발한 곳이다.



(a) 총 질소량 (b) 총 인량

그림 2. 해수 수로내 총 질소 및 인량 모니터링 결과

그림 3은 해수 수로내 총 질소량과 총 인량(TP)의 변화와 현장 모니터링을 고려한 조류발생 예상지역이다. 총 5곳의 조류 발생예상 지역은 해수 수로내 유속이 정체된 지역이다. 이러한 지역들은

특히 그림 4에서 보인바와 같이 z방향 와도가 높은 곳으로 나타났다. 해수수로내의 흐름이 정체된 상황에서 국부적으로 z방향 와도가 높은 지역은 정체된 수체가 외부로 이동하지 못하고 정체 된다. 또한 상대적으로 높은 와도로 인하여 해수내에 포함된 인의 하상 침강을 저해하여 조류발생 가능성을 높이는 것으로 판단된다. 또한 수로내에 설치된 섬과 인접한 지역은 집중호우로 인하여 조경토가 유입되었으며 조경토에 함유되어 있는 영양염의 유입으로 총 질소과 총 인의 량을 증가시켰다.

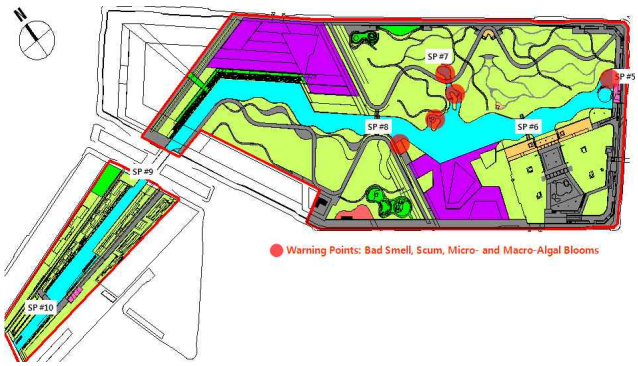
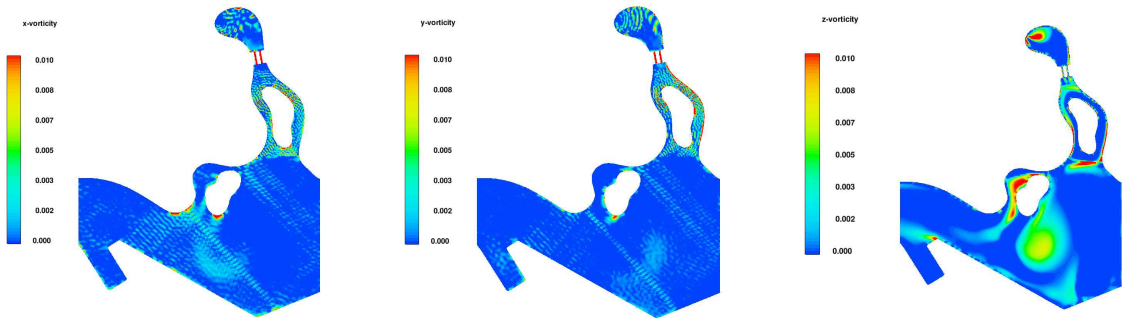


그림 3. 수질 모니터링 관측 지점 및 조류발생 예상지역



(a) x 방향 와도 (b) y 방향 와도 (c) z 방향 와도

그림 4. 해수 수로내 와도

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 수치모형을 이용한 인공 해수수로내의 흐름특성(유속, 와도) 모의와 수질 모니터링의 통한 조류 생성 특성 및 장소를 비교 분석하였다. 현장 모니터링을 통하여 예측된 조류 발생 예상지역은 유속이 거의 없는 정체수역과 일치 하였으며, 특히 z 방향 와도가 높은 곳에서는 수체가 외부로 이동을 방해하며, 인의 하상 침강을 저해하여 조류발생 가능성을 높이는 것으로 판단되었다. 이러한 와도와 유속 특성을 고려한 함으로써 인공 호수 및 수로 계획시 조류 생성의 억제에 도움을 줄 수 있는 단면 설계를 할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Arup, 2006. Songdo Central Park and Canal Design Development Report: Canal, Arup October 2006.
2. 송도신도시개발유한회사, 2006. 송도 국제업무단지 중앙공원 조성사업: 환경영향평가
3. Flow Science, (2003). *Flow-3D User's Manual*, Los Alamos, NM, USA.