

호소 퇴적물 용출특성에 관한 연구



최 이 송 |
유네코개발 주식회사
isongchoi67@hotmail.com



이 상 은 |
경희대학교 석사과정
itsyou21@nate.com



오 종 민 |
경희대학교 정교수
jmoh@khu.ac.kr

머리말

국제적으로 물 부족국가로 분류된 한국에서 하구 담수호의 건설은 수자원 확보를 위한 효과적인 방안의 하나이다. 그러나 이러한 인공 담수호는 담수화 과정에서 많은 오염부하에 노출되어 심각한 수질문제를 야기하는 것으로 나타났으며, 이와 같은 정체성 수역에서는 유속이 느리고 물질순환 속도도 느리기 때문에 퇴적되는 오염물질의 양이 많고 저층 퇴적물로부터 용출되는 영양염이 수계의 1차 생

산과 수질변화에 영향을 미치는 주요 요인 중 하나로 알려져 있다(김도희, 2002). 일반적으로 호수의 오염 원인은 크게 자연적 요인과 인위적 요인으로 나누어지며, 이중 자연적 요인에는 지질, 지형, 기상, 생물 요인 등이 포함되며 이를 제외한 나머지 요인 즉, 인간의 일상생활에서 배출되는 각종 오수를 비롯해 공장폐수, 축산폐수 등이 모두 인위적 요인에 해당된다. 호소의 퇴적물은 이러한 다양한 오염원으로부터 유입되어 수층에서 침강되면서 형성된 것으로 일정기간 축적되어 있다가 분해, 확산, 재부유, 생물교란 등의 물리, 화학, 생물학적 과정에 의해 다시 수층으로 용출되고 수질 및 수생태계에 영향을 미친다(Lee *et al.*, 1996). 또한 질소, 인, 중금속, 비타민류 등은 퇴적물의 환경 조건에 따라서 저층 퇴적물로부터 수층으로 용출되어 식물성 플랑크톤의 증식을 촉진시킴으로써 수역의 생물생산과 수질의 변화에 중대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Lerman, A., 1979). 따라서 수역의 생물 생산력과 수질관리를 위해서는 외부로부터 오염물질의 유입원을 조사하고 제어하는 동시에 수역의 지형학적, 구조적인 특성과 더불어 주변 환경여건의 변화에 따라 퇴적물로부터 발생될 수 있는 오염물질의 용출량을 정량적으로 파악하는 것은 매우 중요하다(조영철, 2007). 따라서 본 연구에서는 화학성 퇴적물의 이화학적 성질과 퇴적물로부터 영양염류 용출특성 조사를 통해 영양염류 상태를 파

악하여 호소 수질관리를 위한 자료를 제시하고자 한다.

조사지점 및 현황

본 연구의 조사 지점은 경기도 화성시에 위치한 화성호를 대상으로 호소의 퇴적 특성을 고려하여 선정되었다. 그림 1은 화성호 시료채취 지점으로서 HSL1 지점은 화성호 주요 유입하천인 남양천, 자안천 합류지점으로서 하천유역의 오염물질이 화성호로 유입되는 주요 유입경로이며, 수로 주변에는 농경지가 많이 위치하고 있다. 또한 수로 말단부에는 마도지방산업단지가 위치하고 있고 남양하수처리장 방류수가 연중 유입되는 지점이다. HSL2 지점은 남양수로와 하저수로가 만나는 지점으로 방조제를 기준으로 우측에 넓은 간사지가 있으며, 수심은 좌측이 깊고 우측이 얇은 평균수심 6 m 내외의 수로형태를 띠고 있다. 또한 HSL2 지점은 화옹방조제로부터 약 5 km 내외의 지점으로 해수유통 시간접적으로 해수에 의한 영향을 받고 있다. HSL3 지점은 화성호의 방조제에 인접한 호중양부로 화성호 체적의 대부분을 차지하고 있어 호의 대표적인 수질을 형성하는 부분이며, 해수유통 시 직접적으로 해수에 의한 영향을 받는 지점이기도 하다.

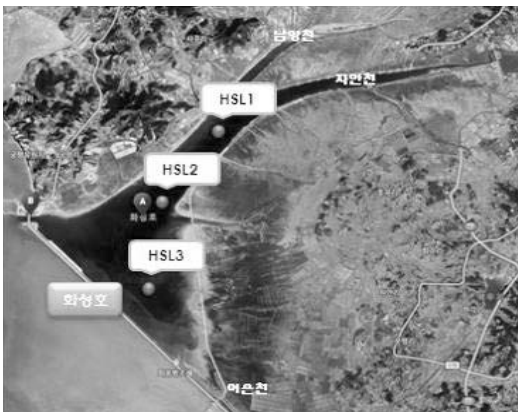


그림 1. 화성호 조사 지점

시료의 채취 및 분석

퇴적물은 화성호 3개 지점에서 grab sampler를 사용하여 채취하였다. 채취한 퇴적물에 대해서는 입도 및 오염도 분석, SOD, 용출실험 분석을 수행하였으며, 각 지점의 연간 퇴적량 파악을 위해 퇴적속도를 측정하였다. 오염도는 다음 표 1과 같은 방법으로 분석하였으며, 입도분석은 Stock's law에 따라 풍건한 시료를 일정량(50g) 취하여 준비된 5% 분산제에 침지, 분산시키고(18시간 이상) 핸드 스트러를 이용하여 상하로 1분간 교란시킨 후 비중계를 이용하여 30초에 1차 측정하며 이후 7시간 20분후 다시 비중계를 이용 2차 측정하였다. 토성은 미국 농무성의 토양분류법에 따라 토성분류를 하였다. 또한 저층퇴적물에 대한 SOD 실험은 직경 6.5 cm, 높이 19.4 cm의 폴리에틸렌 용기에 현장에서 채취한 퇴적물을 약 8~10 cm 높이로 바닥에 깔고, 현장에서 채수된 물로 채운 후 DO meter를 이용하여 DO 농도를 일정 시간 간격으로 연속 측정하여 SOD 값을 산출하였다. 또한 퇴적속도는 침전되는 물질을 채집할 수 있도록 샘플통을 설치하여 포집된 퇴적물로부터 단위면적 및 시간을 고려하여 산출하였다. 본 연구에서 용출실험은 반응조 바닥에 각 지점별 퇴적물을 넣고 현장에서 채수한 물을 이용하여 실험을 실시(그림 2 참조)하였고, 실험조건은 호기성 및 혐기성 조건으로 구분하여 각각 실험을 실시하였다. 호기성 조건은 실험장치내의 DO 농도가 9~10 mg/L 범위를 유지할 수 있도록 계속하여 O₂를 주입하였고, 혐기조건은 실험장치내의 산소공급이 되지 않도록 밀봉하고 N₂ 가스를 계속 주입함으로써 조성하였다.

표 1. 오염도 분석방법

분석항목	분석방법	비고
강열감량	폐기물 공정 시험법	650~750°C
COD	해양오염 공정 시험법	-
T-N	흡광도법(220nm)	과염소산 전처리
T-P	흡광도법(880nm)	과염소산 전처리



그림 2. 퇴적물 용출실험 전경

입도분석결과

화성호 입도분석결과 HSL1 지점은 Sand 성분이 37.5%로 다른 지점에 비해 Sand 성분을 많이 포함하고 있었으며, 이는 유입하천의 영향으로 인하여 입자가 큰 물질이 유입되어 상류부인 HSL1 지점에 퇴적되었기 때문으로 판단된다. HSL1 지점에서 가장 비율이 높은 것은 Silt(51.2%)였으며, 토성은 SiL로 분류되었다. HSL2 지점은 화성호 내 중류부로서 Clay 및 Silt가 각각 16.2%, 72.5% 함유한 것으로 나타났으며, 토성은 SiCL로 분류되었다. HSL3 지점은 방조제에 가장 가까이에 위치하고 있는 지점으로 토성이 SiL로 나타나 Clay 성분 함유 비율이 HSL2 지점에 비하여 적은 것으로 조사되었다. 일반적으로 하류부로 갈수록 가벼운 물질이 보다 멀리까지 이동하여 침강되므로 중류부인 HSL2 지점보다 하류부인 HSL3 지점에서 보다 미세한 하상퇴적물이 많을 것으로 예상되었으나, 본 연구에서는 HSL2 지점이 HSL3 지점보다 Clay 및 Silt 성분을 많이 함유한 것으로 나타났다. 이는 7월의 강수로 인해 수문을 열어 해수유통이 일어나는 과정에서 직접적 영향권에 있는 HSL3 지점의 침강퇴적물 중 일부가 유출되었기 때문으로 판단된다.

표 2. 퇴적물의 입도분석결과 및 토성구분

지 점	Clay(%)	Silt(%)	Sand(%)	토성구분
HSL1 지역	11.2	51.2	37.5	SiL
HSL2 지역	16.2	72.5	11.2	SiCL
HSL3 지역	13.5	66.3	20.0	SiL

오염도 분석

퇴적물 중의 유기물 함량은 장기적으로 수체의 수질에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 유기물 함량을 평가하기 위하여 강열감량과 COD를 분석하였다. 또한 정체성 수역에서 부영양화의 주요 원 인물질로 파악되고 있는 T-N 및 T-P를 분석하였다. 이에 대한 결과는 다음의 표 3에 나타내었다.

휘발성 유기물의 총량을 평가할 수 있는 강열감량은 HSL1 지점이 12.37%, HSL2 지점이 10.95%, HSL3 지점이 9.90%로 나타났다. 강열감량의 경우 상류부인 HSL1 지점이 가장 높고 하류부로 갈수록 함량이 떨어지는 것으로 조사되었다. 영양물질 함유량 분석 결과에서는 T-N이 7,313~8,161 mg/kg, T-P가 295~353 mg/kg의 범위를 보였으며, HSL3 지점보다 HSL1 지점의 T-N, T-P 농도가 높은 것으로 나타났다. 퇴적물의 오염도 분석결과, 전반적으로 유입부에 위치한 HSL1 지점에서 오염도가 높은 것으로 나타났는데, 이는 HSL1 지점이 남양천 및 자안천 등 지천으로부터 유입되는 오염물질의 영향을 직접적으로 받기 때문으로 판단된다. 특히 남양천의 경우 남양하수처리장에서 배출되는 방류수가 유입되는 곳으로 다량의 오염부하가 지속적으로 화성호로 유입되어 하상 퇴적물 오염에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그렇지만 국내·외 보고된 퇴적물의 오염도 분석결과와 비교해 보면, 마산만의 경우 강열감량 12.9%, COD 35,770 mg/kg, T-P 479 mg/kg(박동규, 1995), 진해만의

표 3. 퇴적물 오염도 분석 결과

구분	HSL1	HSL2	HSL3
강열감량(%)	12.37	10.95	9.90
COD(mg/kg)	19,810	22,411	23,612
T-N(mg/kg)	8,161	7,313	7,328
T-P(mg/kg)	353	344	295

경우 강열감량 11.8%, COD 28,030 mg/kg, T-P 376 mg/kg(박동규, 1995), 팔당호의 경우 강열감량 0.1~20.2%, COD 1,800~24,600 mg/kg, T-N 20~2,20 mg/kg, T-P 214~1,625 mg/kg(정용준, 2006) 등으로 조사되어 화성호 오염도 현황은 다른 호소에 비해 비슷하거나 더 낮은 오염도를 보이는 것으로 조사되었다. 이는 화성호가 배수갑문 조작에 의한 해수유동으로 다른 지역의 호소보다 퇴적층 발달이 느리고, 잦은 퇴적물 혼합 및 교란 때문인 것으로 판단된다. 따라서 화성호 수질보전 및 개선을 위해서는 지속적인 퇴적물 모니터링뿐만 아니라 유입하천의 수질개선을 위해 보다 구체적인 방안을 수립하고 체계적인 관리가 이루어져야 할 필요가 있다.

SOD(sediment oxygen demand)

퇴적물 중 유기물 형태의 오염물질은 퇴적층의 다양한 작용(생물학적 작용 및 화학적 작용)에 의하여 분해되며, 이 과정에서 수중의 DO 농도를 저감해 간다. 이와 같은 퇴적물에 의한 수중의 DO 농도 소모는 수환경의 자정능력 감소 및 수생태계에 악영향을 미칠 수 있다(오종민 등, 2007). 따라서 수중 퇴적물이 의해 저감되는 수중 DO 농도변화를 시간에 따라 분석하여 퇴적물이 수환경에 미칠 수 있는 영향을 파악하였다.

화성호 퇴적물에 의한 SOD 실험에서 초기 DO 농도는 7.6 mg/L 이었으며, HSL1, 2, 3 지점 모두 초기에 급격히 감소하는 경향을 보였다(그림 3 참조). 그렇지만 실험이 진행되면서 2시간 경과 이후

부터는 완만하게 DO 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 실험종료 후 총 SOD 량을 측정된 결과 HSL1, 2, 3 지점 각각 1.41 g · O₂/m² · day, 1.63 g · O₂/m² · day, 2.83 g · O₂/m² · day으로 나타나, HSL3 지점에서 산소소모량이 다른 지점에 비하여 크다는 사실을 알 수 있었다. 이에 따라 화성호 퇴적층과 수계 사이에서 자정작용이 활발히 일어나면서 산소가 소모되므로 하부층의 수계는 호기성일 경우보다 혐기성일 가능성이 큰 것으로 예상할 수 있다.

다음 표 4는 실험에 의해 산출된 SOD 값을 가지고 각 지역면적을 이용하여 소모되는 총 DO량을 산출하였다. 결과로부터 화성호 퇴적층으로부터 하루에 소모될 수 있는 산소량은 26,276 kg인 것으로 나타났으며, 평균 퇴적물 산소소모속도를 의미하는 SOD는 1.978 g · O₂/m² · day이었다. 다른 연구에서 보고된 흥부저수지의 평균 SOD 값을 보면 1.282 g · O₂/m² · day(농업기반공사, 2005)로 본 연구에 의해 조사된 화성호 퇴적물 산소소모속도가 0.696 g · O₂/m² · day 만큼 더 빠른 것으로 나타났다.

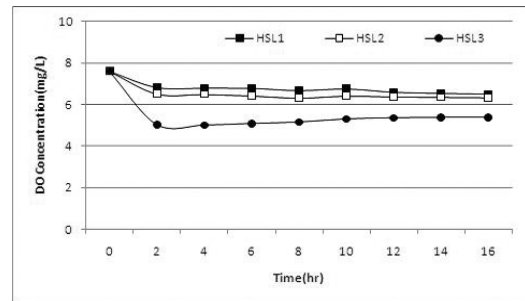


그림 3. SOD 측정에 따른 DO농도 변화

표 4. 퇴적물 SOD량

지역	퇴적물의 면적 (km ²)	SOD	kg · O ₂ /day
HSL1 지역	5.7	1.41	8,021
HSL2 지역	2.7	1.63	4,389
HSL3 지역	4.9	2.831	3,861
합계	13.3	-	26,276

퇴적량 산정

다음 표 5에 화성호의 오염물질별 연간 퇴적량 산정 결과를 나타내었다. 화성호의 연간 퇴적량은 TSS 20,922 ton/yr, COD 4,724 ton/yr, T-N 1,404 ton/yr, T-P 181 ton/yr로 산정되었으며, 하류지역인 HSL3 지점에서 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 하루 동안 화성호의 퇴적깊이를 TSS기준으로 산정해 보았다. 조사한 문헌의 저수지 및 호소의 퇴적물 입자 평균 밀도인 1.54 g/cm³(농업기반공사, 2005)를 적용하여 산정한 결과 화성호에 하루 동안 퇴적되는 깊이는 4.31×10⁻⁵ cm/day로 나타났으며, 연간 퇴적깊이는 0.015 cm/yr로 나타났다. 다른 연구에서 보고된 호소의 퇴적속도가 23 cm/yr(농업기반공사, 2005)인 점을 고려하면, 화성호의 경우 연중 퇴적물로 인하여 감소되는 깊이는 낮은 것으로 판단된다. 이는 배수갑문 영향으로 퇴적층의 이동이 빈번하기 때문에 체류시간이 짧아 안정적인 퇴적층 형성이 어렵기 때문으로 판단된다. 따라서 화성호는 퇴적물에 의한 수체의 수질에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 판단되며, 화성호 수질개선을 위해서는 유입하천에 대한 관리가 더욱 필요할 것이라 판단된다. 하지만 이는 내·외부적 환경변화를 고려하지 않은 양이므로 실제 퇴적속도는 차이가 있을 수 있으므로 퇴적물에 대한 지속적 관심은 필요하다.

표 5. 각 지점별 퇴적량

	TSS (ton/yr)	COD (ton/yr)	T-N (ton/yr)	T-P (ton/yr)
HSL1 지역	8,457	2,205	790	114
HSL2 지역	3,064	725	167	32
HSL3 지역	9,401	1,794	447	35
총 퇴적량	20,922	4,724	1,404	181

퇴적물의 영양염류 용출

저수지의 저부에 퇴적된 퇴적물은 항상 재용출에 의한 내부오염 가능성을 내포하고 있다. 즉 퇴적물

은 주변 환경여건의 변화에 따라 화성호의 수질을 악화시킬 수 있으므로 이들에 영향을 줄 수 있는 환경변화에 따른 정량적 용출량을 파악하여 두는 것은 안전한 수질관리 측면에서 중요하다(경희대학교, 2010). 퇴적물로부터의 영양염류 용출실험은 이와 같은 내재적 오염물질이 수질에 미칠 수 있는 영향을 예측하기 위하여 실시하였다.

화성호의 퇴적물 용출실험 결과, 호기성 상태에서 T-N은 24시간 동안 용출이 일어나다가 이후 용출이 일어나지 않는 것으로 조사되었다. 평균 용출속도를 산정한 결과 HSL1 지점은 음의 값을 보였으며, HSL2 지점은 67.24 mg/m²·day, HSL3 지점은 6.59 mg/m²·day로 HSL2 지점에서 더 높게 측정되었다. 혐기성 상태에서 HSL1은 음의 값을 보였으며, HSL2, HSL3 지점은 24시간 동안 용출이 빠르게 일어난 후 음의 값을 보였다. 또한 혐기성 상태의 평균 용출속도를 산정한 결과 HSL1 지점은 음의 값을 보였으며, HSL2 지점은 24.69 mg/m²·day, HSL3 지점은 22.25 mg/m²·day로 HSL2 지점에서 더 높게 용출이 되는 것으로 측정되었다. T-P에 대한 호기성 상태에서는 HSL1 지점 및 HSL2 지점에서 음의 값을 보였으며, HSL3 지점에서는 시간이 지나면서 용출속도가 증가하는 경향을 보이다가 96시간에서 음의 값을 보였다. 또한 HSL3 지점의 평균 용출속도는 25.27 mg/m²·day인 것으로 나타났다. 혐기성 상태에서는 48시간 동안에는 용출이 일어나지 않았고, 48시간 이후 용출이 시작되어 HSL1 9.36 mg/m²·day, HSL2 4.45 mg/m²·day, HSL3 15.32 mg/m²·day로 HSL3 지점에서 용출이 빠르게 일어나는 것으로 나타났다. T-P의 용출결과를 살펴보면, 호기성에서는 거의 용출이 일어나지 않고 혐기성에서 용출이 일어나는 것을 볼 수 있었는데 이는 호기성 조건에서 용존산소가 풍부하므로 미생물의 활성도가 증가하면서 인의 용출을 억제하고 흡수하였기 때문으로 판단된다. 반면에 혐기성 상태에서는 용존산소의 부족으로 퇴적물 내 생물학적 대사작용이 미미해지

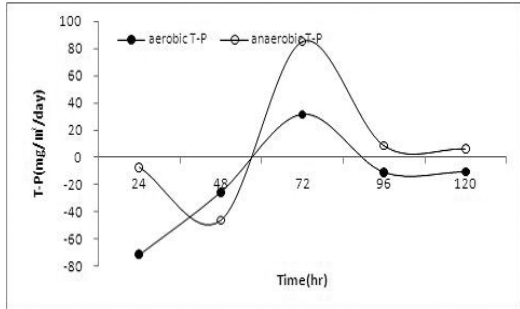
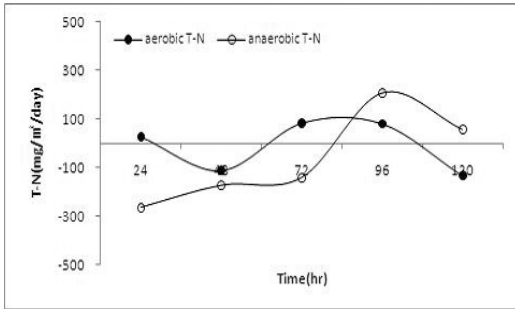


그림 4. HSL1 지점에서의 퇴적물 용출속도

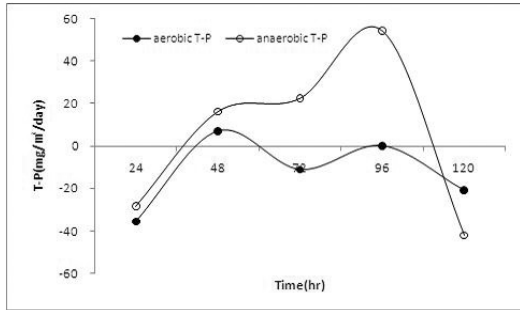
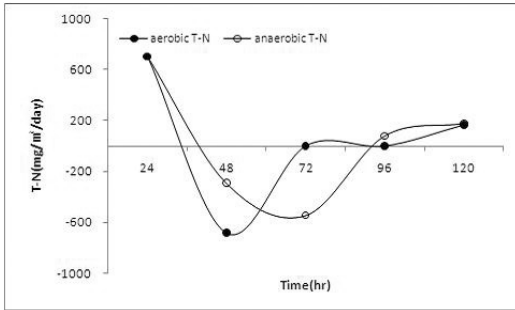


그림 5. HSL2 지점에서의 퇴적물 용출속도

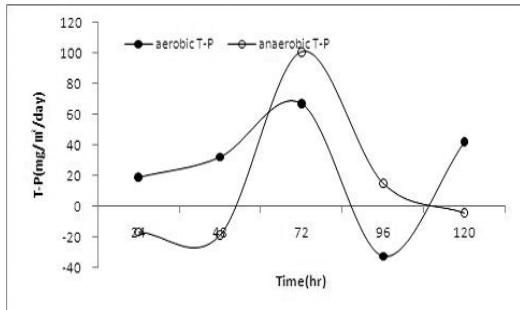
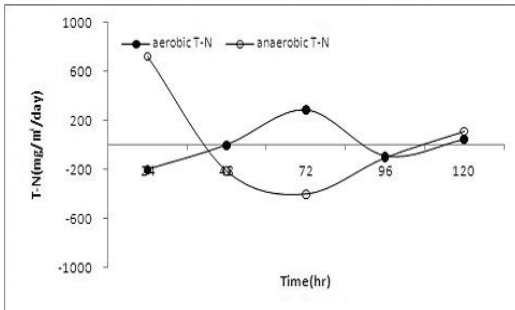


그림 6. HSL3 지점에서의 퇴적물 용출속도

고 흡수되는 인은 적어지는 반면에 퇴적물 내 화학적으로 결합되어 있는 산소가 소모되면서 인 성분이 수중으로 방출되기 때문에 수체의 인 농도가 증가한 것으로 해석된다. 결국 본 조사지점에서의 퇴적물은 대체적으로 호기성 조건에서 흡수, 혐기성 조건에서 용출이 일어나는 것으로 나타났으나, 그 메커니즘은 매우 복잡하게 전개되는 것으로 판단된다. 결국 환경조건의 변화는 퇴적물 내에서의 물질순환 과정에 영향을 미치며 수체에 대한 잠재적 영향을 미칠 수 있는 중요한 요인 중 하나라는 사실은

분명해 보인다.

결론

본 연구에서는 최근 해수유통이 시작된 화성호의 퇴적물을 대상으로 오염도 분석을 포함한 다양한 실내 및 현장 실험을 통하여 수체의 수질에 직·간접적 영향을 미칠 수 있는 요인에 대하여 검토해 보았다. 화성호 퇴적물에 대한 오염도 분석에서는 유

입부인 HSL1 지점에서 유기물 및 T-N, T-P 등의 농도가 높았고, 최 하류에 위치한 HSL3 지점은 상대적으로 오염도가 낮은 것으로 조사되었다. 이는 유입되는 오염물질로 인하여 HSL1 지점이 직접 영향을 받는 것도 하나의 원인이지만, 화성호의 해수 유통으로 인하여 직접 영향권에 있는 최하류에 침전된 퇴적물이 일부 유출되면서 오염도가 감소한 것도 하나의 원인으로 판단된다.

퇴적물에 의한 잠재적인 영향을 파악할 수 있는 실험에 있어서, SOD는 HSL3 지점이 다른 지점보다 비교적 높았고, 다른 호소와 비교해도 산소소모 속도가 빠른 것으로 조사되었다. 이는 퇴적된 오염물질에 대한 생물학적 분해속도가 빠르다는 것을

의미하며, 화성호 내 퇴적층에서 자정작용이 활발히 일어나면서 수체의 저층에서 혐기상태가 되기 쉬운 환경이 조성된다는 것을 의미한다. 화성호에서의 용출실험 결과를 보면, 대체적으로 호기상태에서는 퇴적층에 흡수가, 혐기상태에서는 용출이 일어나 일반적인 호소 퇴적물에 대한 용출실험 결과와 유사한 것으로 나타났으나, 화성호에서의 영양물질의 용출 메커니즘은 매우 복잡하게 전개되는 것으로 파악되었다. 결국 화성호는 최근 해수유통으로 퇴적물의 오염도가 낮고 침강속도는 늦지만, 하상바닥에 침전되어 퇴적된 오염물질이 잠재적 오염원으로 작용할 수 있는 환경을 가지고 있으므로 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단된다. 🌊

참고문헌

1. 김도희, 2002, “영양염 용출 측정에 관한 고찰”, 한국환경과학회지, 11(12), 1333-1337
2. 경희대학교, 2010, 화성호 오염부하량 산정 및 수질오염 영향 평가
3. 농업기반공사, 2005, 흥부지구 강우시 수질조사 및 퇴적물 조사 연구용역 최종보고서
4. 박동규, 1995, “남해연안 해양퇴적물 저질산소유구량과 영양염류 용출”, 경남대학교
5. 오종민, 조영철, 2007, “소규모 저수지에서 퇴적물로부터 영양염류의 용출이 수질에 미치는 영향”, 대한환경공학회지, 1217-1222
6. 정용준, 2006, “팔당호 퇴적물 오염 현황 조사”, 한국습지학회논문집, 제8권 제4호, 49-58
7. 조영철, 정세웅, 2007, “남양호 퇴적물에서 영양염류 용출 특성 분석”, 대한환경공학회지, 1345-1352
8. Lee, S. H. and Kim, Y. H., 1996, "A Study on the Nutrient Release in Artificial Lake Sediment," Environ. Res., 15(2), 25-33
9. Lerman, A., 1979, 히로시마만의 질소수지에 미치는 퇴적물 중 질소화합물의 생물화학적 변환과정의 역할, 히로시마대학교 박사학위논문