

시화호 조력발전 건설에 따른 환경 변화

신 향 식 | 대한환경공학회 회장·한국과학기술원

1. 서 론

조력발전소 사업 예정 지구인 시화방조제(길이 12.7km)는 1992년 준공 이후 안산시를 중심으로 주변지역의 인구증가와 반월·시화공단 입주업체들의 주속적인 증가로 수질오염이 가속되었으며, 인근지역의 농가에서 가축사육으로 인한 오염원의 증가로 종합적인 수질대책이 요구되어 왔다.

본 사업은 대체에너지 개발을 통한 전원개발과 기후변화 협약 등으로 인한 CO₂ 저감대책에 적극 대응함과 동시에 해양에너지 개발을 통한 안정적 전력공급과 시화호의 종합적인 수질대책의 일환으로 추진되고 있으며, 서해안의 큰 조석간만 차를 이용하여 조력발전소를 건설함으로써 시화방조제의 운영방법을 담수호에서 해수호로 전환하고, 동시에 홍수조절 능력을 유지하면서 조석간만의 차를 이용한 해수순환을 통하여 해수정체로 인한 수질악화를 방지하는데 그 목적이 있다.

본 논문에서는 시화호 조력발전소 사업지구의 환경현황에 대한 개요를 소개하고, 타당성조사 및 기본계획 수립시 검토한 발전소 건설·운영에 따른 해수의 유동과 퇴적물 이동 영향 예측, 시화호내·외 수역의 오염물질 이송·확산 영향 예측, 그리고 생태계에 미치는 영향을 간략히 소개하고자 한다.

2. 주변지역 환경현황

2.1 지역개황

시화방조제 완공으로 발생한 간석지를 산업단지로 개발하고 화물 물동량의 원활한 소통 및 인천, 시흥, 안산지역의 연결 간선도 역할을 하고 있다. 행정구역상 시흥시 및 안산시에 포함되어 있어 동북쪽으로 서울, 인천과 같은 대도시가, 서남방향으로 아산지역 등 서해안지역과 인접하여 있다. 지형적으로는 서해안지역에서 일반적으로 볼 수 있는 내륙에서 해안으로 향하는 완경사지를 이루며, 대부분 지역은 끝막이 공사로 발생한 간석지와 농경지로서 남서방향으로 수로를 형성하면서 시화호 및 외해로 방류되고 있다.

수도권 서남부지역은 타 지역에 비해 낙후되어 있었으나 현재 지역개발이 활발히 진행되고 있으며, 본 사업지구가 서울, 인천, 충청도 및 전라도의 공업지대를 연결하는 지리적 여건을 갖추고 있을 뿐만 아니라 서해안 고속도로, 수도권 전철, 영종도 신공항, 인천항 등과 근거리에 위치하고 있어 본 사업지구는 수도권 서남부지역의 중심공업도시의 잠재력을 갖고 있다.

2.2 시화호 현황

1994년 방조제 공사 완료후 해수유통이 차단되고

표 1. 토지 이용 현황

(단위 : km², %)

구 분	계	전	답	임야	염전	대지	공장	도로	하천	기타
안산시	144.9	10.9	20.2	57.5	2.8	13.2	10.6	11.6	1.1	17.0
	100.0	7.5	13.9	39.7	1.9	9.1	7.3	8.0	0.8	11.8
시흥시	131.5	17.5	22.4	43.1	5.5	8.6	5.8	11.5	1.4	15.7
	100.0	13.3	17.0	32.8	4.2	6.5	4.4	8.7	1.1	12.0

자료 : 1. 안산시 통계연보, 2001, 안산시
2. 시흥시 통계연보, 2001, 시흥시

인근지역으로부터 유입된 오염물질이 호내에 축적되어 오염이 증가하고 있어 수질개선 대책이 시급한 과제로 대두되고 있다. 시화호는 호수 수리특성상 넓은 수면적과 얕은 수심, 긴 체류기간을 갖는 수질오염에 취약한 폐쇄성 호수로서, 호내에 유입된 오염물질의 배출이 어렵고, 장시간 체류에 따른 오염물질의 축적으로 오염의 정도가 가중될 수밖에 없는 취약성을 지니고 있다. 따라서 시화호의 수리특성을 근원적으로 변경할 수 있는 방안 즉, 여타의 사업과 연계하여 시화호를 축소, 분할 및 적정수심 확보 방안 등을 고려한 호수형상의 최적안이 마련되어야 할 실정이다.

(종밋)와 거의 모든 정점에서 높은 밀도로 출현하였던 P. ligni의 개체군이 9월조사에서는 현저하게 감소한 것을 알 수 있었다. 이러한 저서동물군집의 변동양상은 이 시기의 시화호 저서환경을 잘 보여주고 있는 것으로 생각된다. 이와 같은 저서동물의 변동양상은 여름철 동안의 고온으로 인하여 발생한 저층수괴의 빈산소화에 기인하는 것으로 생각된다.

또한 저층의 용존산소 농도가 9월 조사시 모든 정점에서 매우 낮게 나타났으며, 정점 1과 정점 2에서는 5.2ppm 수준으로 빈산소 수괴의 특성을 나타냈다. 저서환경에 이와 같은 빈산소 수괴가 발달함으로 인

2.3 토지이용 현황

시화호 주변의 토지이용현황은 표 1.과 같이 안산시, 시흥시 모두 농경지(전, 답)와 임야가 전체의 60% 이상을 차지하고 있는 것으로 조사되었다.

2.4 해양생태계 현황

2001년에 실시된 시화호 내부 해역의 조사 결과 3월에 비교하여 9월에 매우 빈약한 저서동물이 채집되었다. 9월의 종수, 개체수, 생물량은 3월과 비교할 때 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다. 9월의 정점 1에서는 1종, 10개체 그리고 정점 2번에서는 단 한종의 저서동물도 출현하지 않았고, 3월 조사에서 배수 갑문 주변 정점에 우점하였다 M. senhausia

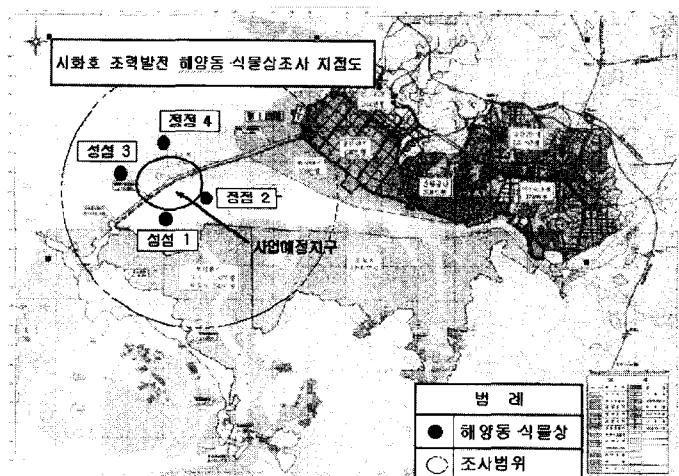


그림 1. 사업예정지구 주변해역의 해양동·식물상 조사 지점도

표 2. 시화호 조사정점의 저층 용존산소 자료

(단위 : ppm)

날짜	St.01	St.02	St.03	St.04
Mar-01	10.37	12.3	12.38	12.03
Sep-01	3.2	5.2	7.56	6.83

표 3. 저서동물 군집의 조사시기별 종수, 개체수, 다양도, 균등도

(단위 : ind./m²)

(a) 종수

날짜	St.1	St.2	St.3	St.4	합계
Apr-00	25	21	52	45	72
Sep-00	4	18	22	19	36
Mar-01	14	17	36	34	48
Sep-01	1		20	19	28

(b) 개체수

날짜	St.1	St.2	St.3	St.4	합계
Apr-00	4,305	3,345	13,496	15,440	9,147
Sep-00	66	420	2,679	591	939
Mar-01	9,169	3,200	35,568	2,261	12,550
Sep-01	10	-	1,103	930	486

(c) 다양도

날짜	St.1	St.2	St.3	St.4
Apr-00	3.146	2.955	3.841	3.702
Sep-00	1.332	2.784	2.984	2.845
Mar-01	1.256	1.057	1.278	1.382
Sep-01	0	-	1.919	2.018

(d) 균등도

날짜	St.1	St.2	St.3	St.4
Apr-00	0.977	0.970	0.972	0.973
Sep-00	0.961	0.963	0.965	0.966
Mar-01	0.476	0.532	0.357	0.392
Sep-01	0	-	0.637	0.685

하여 시화호 안쪽의 정점들 뿐 아니라, 상대적으로 양호하였던 배수 갑문 주변의 저서동물 생태계까지 영향을 받은 것으로 생각된다.

시화호의 저서동물군집의 시공간적 변동양상을 파악하기 위하여 과거의 연구 결과의 종 수 및 개체수와 비교하여 보았다. 2000년 조사에서는 77종이 출현하였으나, 2001년 본 조사에서는 다소 감소한 57종이 출현하였다. 전체 출현 종수에 대한 각 동물군별 우점순위는 환형동물, 절지동물, 연체동물, 기타동물군, 극파동물의 순서로 2000년 조사 결과와 비교할 때 절지동물과 연체동물의 순위가 역전되었다. 개체수의 관점에서는 2000년 5,042개체/m², 2001년 본 조사에서는 6,518개체/m²가 출현하여 다소 증가하는 양

상이 나타났다.

개체수 관점에서의 우점종을 살펴보면, 일부 종의 순위변화가 관찰되기는 하나, *M. senhausia* (종잇), *P. ligni* (긴 얼굴갯지렁이 속), *C. archerusicum*, *N. succinea* (두줄박이참갯비렁이), *H. filiformis* (버들갯지렁이과)와 같은 저서동물이 2000년에 이어 2001년에도 상위에 우점종으로 나타났다. 조사시기별로 살펴보면, 봄에 극우점하였다가 가을에 급격히 감소하는 양상을 나타내었는데, 2000년과 2001년 모두 유사한 경향을 나타내었다.

M. senhausia (종잇), *P. ligni* (긴 얼굴갯지렁이 속)과 같은 종은 기질에 밀생하면서 각각 촘촘한 족사와 튜브를 생성하는 서식양상을 보이는 저서동물이다. 이러한 생태적 특성 때문에 기질 표면위에 일종의 mat를 형성하게 되고, 결국 기질과 저층 해수와의 접촉면적을 감소시켜 심각한 환원환경을 유발하여 저서동물상의 변화를 유발하게 된다. 2000년 조사에 이어 본 조사에서도 이들 저서동물이 계절적으로 극우점하는 양상을 관찰할 수 있었다.

한편, 전 세계적으로 유기물 오염 지표종으로 알려져 있는 *H. filiformis* (버들갯지렁이과), *Capitella capitata* (버들갯지렁이과), *T. fragilis* (애기반투명조개) 등과 같은 저서동물은 2000년에 이어 꾸준히 상위 우점종에 포함되고 있는 결과로부터 시화호 내부 해역에 유기물 오염이 진행을 감지할 수 있다. 또한 이들 저서동물은 환경적으로 교란된 서식처에 가장 우선적으로 재정착 (recolonize)하는 기회종들로서 시화호 저서환경의 불안정성을 지시해주고 있다.

그러나, 인근 해역의 저서동물상과 비교할 때 매우 빈약한 출현 종수를 보일 뿐만 아니라, 배수 갑문 주변에 제한된 이러한 회복양상과, 일부 종들에 의하여 우점되는 양상은 생물학적 천이단계에서 오염의 징후

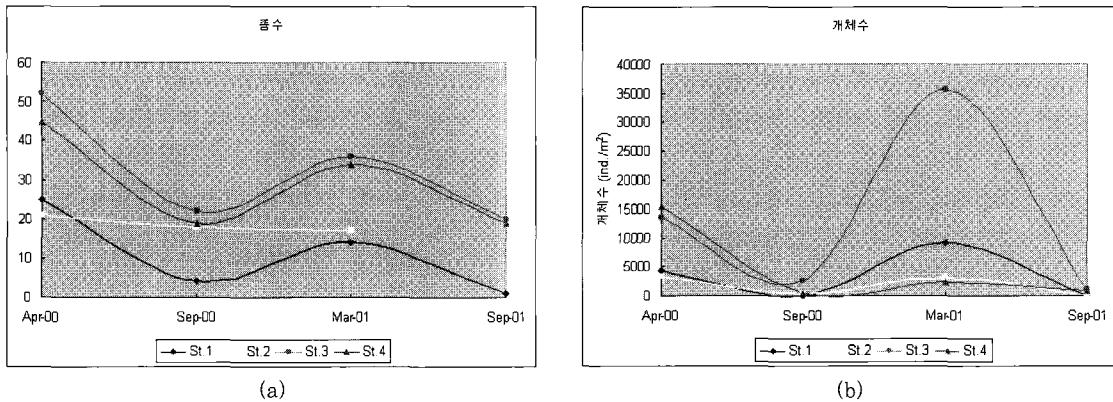


그림 2. 저서동물 군집의 종수(a), 개체수(b)의 변화 (2000.4~2001.9)

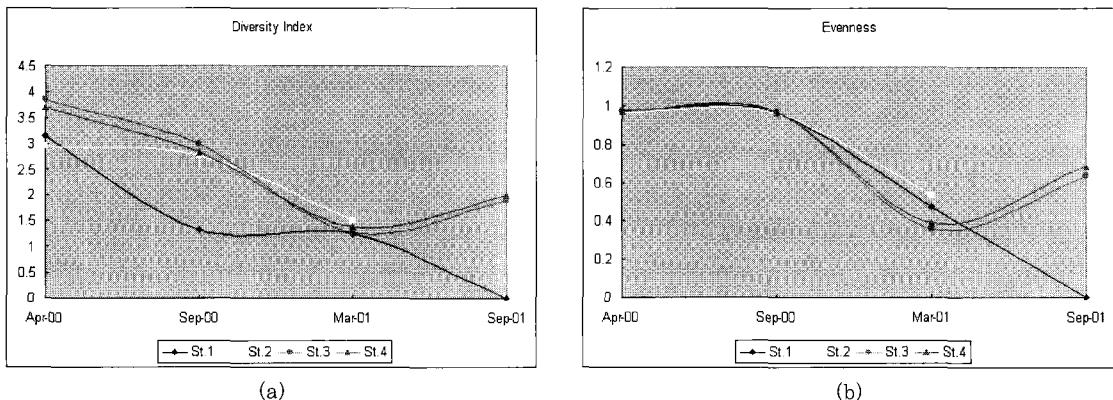


그림 3. 저서동물 군집의 생태학적 제지수 (a : 다양도, b : 균등도)의 변화

가 감지되는 국면으로 생각된다.

본 조사결과를 최근 4년간의 조사결과와 비교하여 보면, 대형저서동물의 연간 출현 종수는 예년의 증감 패턴을 보이면서 약간 증가하는 경향을 보였고, 개체수는 1999년 이후 3년간 지속적으로 증가하였다. 반면에 생체량은 98년 이후 지속적인 감소 경향을 보이고 있으며, 다양도지수는 97년 이후의 감소세가 다소 둔화 되기는 하였으나 여전히 낮은 수준에 머물러 있다.

본 조사지역의 저서동물 개체수가 증가하고 있는 것은 주로 환형동물 다모류의 지속적 증가에 기인한 결과이며, 특히 기회주의적 성격의 버들갯지렁이류 *Heteromastus filiformis*가 높은 밀도로 출현하고 있기 때문이다. *Heteromastus filiformis*는 일반적으로 생태학적 천이과정 중 기존의 안정된 군집이 교

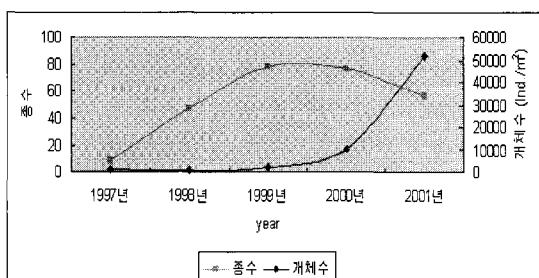


그림 4. 저서동물 군집의 종수, 개체수의 변동양상

란되어 사라지거나 이들이 새롭게 가입할 수 있는 공간이 생겼을 때 최우선적으로 우점하는 대표적인 기회주의적 생물(opportunistic species)이다.

한편 본 해역에서 점차 높은 서식 밀도를 보이고 있는 오후기갯지렁이 (*Stermaspis scutata*)와 아기

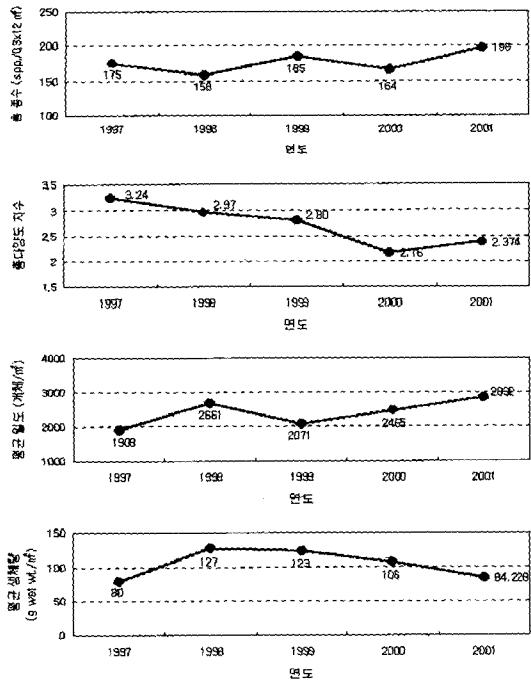


그림 5. 저서동물의 출현종수, 개체수, 생체량의 연간변동

반투명조개 (*Theora fragilis*)는 해역의 내만성이 두드러져서 해수가 정체하기 쉽고 유기물이 많이 퇴적되어 환원성이 강한 미세 퇴적환경에 잘 적응하는 종으로 알려져 있다. 실제로 본 조사해역은 시화방조제와 LNG 인수기지 진입로에 의해 인공적으로 내만이 형성되어 있으며, 시화호 배수갑문과 하수종말처리장 하수관거로부터 지속적인 유기물의 과다공급이 이루어지고 있다. 홍 등 (1997)도 시화호 외곽 해역에서 저서동물의 출현종수와 평균밀도가 시화호 건설 이후에 급증하고, 유기물 오염 지시종인 *Heteromastus filiformis*, *Theora fragilis* 등이 우점하는 것이 부영양화 혹은 과영양화 과정이 진행되기 때문이라고 해석하였다.

따라서 이러한 생태적 특성을 갖는 저서동물들의 현존량이 높아진다는 것은 시화방조제 주변 해역의 저서생태 환경이 아직 생태적으로 안정되지 못하였음을 시사한다.

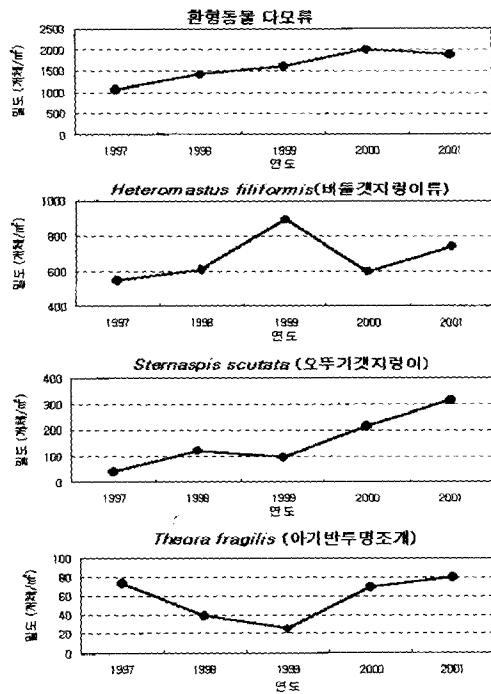


그림 6. 지속적인 증가 추세에 있는 오염지표종수질

3. 해수유동 및 수질영향

시화호 조력발전소 개발계획에 따른 해수유동 및 수질특성 검토와 수문, 수차 배치 등을 목적으로 해수유동, 토사이동, 수질 및 파랑변형 수치실험을 실시하였다. 해수유동 수치실험은 수차와 수문의 위치를 결정하기 위한 제반 기본자료를 제공할 목적으로 실험을 실시하였다. 아울러 수질모델은 해수유동모델과 연계하여 실험을 실시하였고, 퇴적물 모델 계산에 필요한 해수 유동장 산출을 위하여 현재 상태와 수문·수차 인접설치안의 경우 각각 15일간의 유동장을 추적적으로 계산하였다.

3.1 해수유동 수치모형 실험

3.1.1 모델수립 및 모델검증

가. 모델수립

시화호 인근의 조석을 예측하기 위하여 사용된 자

배방정식은 아래와 같이 2차원 수심 평균된 비선형 천해 장파방정식이며, 비선형항 및 수평 난류 확산항을 추가하였다. 지배 방정식은 위도에 따른 전향력(Coriolis force)과 위·경도 함수인 기조력(Tide generating force)을 고려하기 위하여 지구 구면좌표계(Spherical polar coordinate system)상에 기술하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{UV}{h} \right) \\ = - \frac{gh}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial x} (\eta - (1+k-h') \zeta_n) + \frac{UV \tan \phi}{Rh} \\ + 2\omega \sin \phi V - K_b \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{h^2} + F_x \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{V^2}{h} \right) \\ = - \frac{gh}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} (\eta - (1+k-h') \zeta_n) + \frac{V^2 \tan \phi}{Rh} \\ + 2\omega \sin \phi U - K_b \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^2} + F_\phi \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$R \cos \phi \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial (V \cos \phi)}{\partial \phi} = 0 \quad (3.3)$$

위 식에서

x, ϕ, h, η : 경도, 위도 방향좌표, 수심, 해수위 변화

U, V, R : 경도, 위도 방향 질량속, 지구반경

$K_b = g/C^2$: 해저면 마찰계수

(g : 중력가속도, C : Chezy 계수)

$(1+k-h')$: Earth tide에 의한 Modification factor

기조력 함수와 수평 난류 확산항(F)은 Kang et al.(1998)에 제시된 바와 같다. 기조력만에 의한 경기만에서의 M_2 진폭은 약 30cm에 달하나 개방경계에서 입사하는 공진조석에 의해 감쇄가 발생하여 최종적으

로 경기만에서 약 10cm 정도의 기여를 하는 것으로 밝혀졌다 (Kang et al., 1998). 따라서 일차적인 모델 반응을 실험한다는 점에서 기조력을 제외하였다.

또한, 본 실험에서 채택한 격자 시스템은 확장가변 격자망 시스템(Fetched variable grid system)으로 이는 지형특성을 이용한 격자간격의 효율화를 통해 모델계산상의 효율을 극대화하기 위해서이다. 특히 가변격자망 시스템의 채택은 격자간격이 일정한 경우 Truncation 오차가 공간에 따라 차이가 난다는 점을 제외하고는 운동량이나 질량의 보존에 전혀 오차가 없다는 장점이 있다.

나. 모델검증

모델검증을 위한 자료로는 (그림 7)에 제시한바와 같이 조석 1개점(T2)과 조류 2개점에서의 결과를 비교하였으며, 염밀한 검증을 위해서는 황해의 성층에 의한 조석의 계절변화 특성 (Kang et al, 1995; Kang et al., 2002)을 고려하여야 하나 현 단계 과업의 목적상 그러한 영향은 고려하지 않았다.

조석의 경우 지각과 진폭의 변화가 매우 만족스럽게 재현되어 차후 계산해역에서의 조력발전소 건설에 따른 조석에너지의 변화를 평가하는 데 매우 정밀한 기본 자료 산출이 가능할 것으로 판단되었으며, (그림 8)는 조석과 조류의 관측치(실선)와 계산치(점선)를 비교하였다.

그 결과 C1, C2에서의 조류는 주흐름 방향인 동서 방향 성분은 비교적 만족스러우나 남북방향 성분은 계산치가 상대적으로 큰 특성을 보인다.

3.1.2 현재 상태의 조석·조류 특성

현 상태 조류특성을 재현하기 위하여 초기 warming 계산 후에 약 15일간의 연속계산을 실시하였으며, 조류특성 파악을 위하여 M2 조석 약 1주기 동안의 조류 자료를 산출하였다. 수문과 수차는 완전히 닫혀진 조건 즉, 현상태 조건에서 실험하였기 때문에 현상태의 지형조건을 반영하였다.

한편, 기존에 존재하던 갑문 역시 갑문 조작에 대

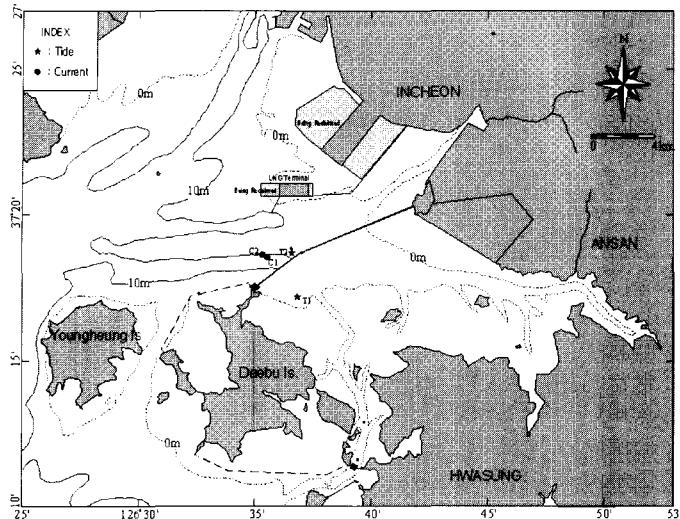


그림 7. 조석·조류 관측지점 위치도

한 정확한 자료가 입수되지 않았고 갑문을 통한 유량 역시 매우 작아 시화호 내에서의 수위 변동이 수 cm 이하로 작기 때문에 현 실험에서는 갑문을 통한 유출입을 고려하지 않았다.

그 결과 창·낙조시 유동패턴은 기존에 알려진 창·낙조 유동패턴과 일치하여 전반적 유동패턴이 잘 재현되었음을 알 수 있었다.

3.1.3 발전소 가동에 따른 조석·조류 특성

가. 발전소 가동조건

- ▶ 초기 발전시작 수두자는 기존 1차원 모형결과를 참조, 3.0m를 적용
- ▶ 발전 후 제시된 수두차 이하에서 발전을 종료조건으로 적용
- ▶ 창조시 발전조건을 부여
- ▶ 시화호 내만의 수위는 평균해수면을 상회하지 않도록 함
- ▶ 낙조시는 수문과 수차를 동시에 가동 방류토록 함

나. 발전소 가동에 따른 조류특성

외해수위가 올라갈 때, 시화호 내로 조류가 유입, 발전이 되고, 외해 수위가 낮아짐에 따라 시화호 내의

해수가 외해측으로 방류되는 모습이 잘 나타나 있다.

수문과 수차가 인접한 안의 실험결과, 낙조시 시화호 내 수위가 외해측으로 방류되는 경우, 수차 통과 유량이 약 3일간의 초기 계산 결과 4,000~5,000톤/초에 달하고 수문을 통한 유량은 최대 7,000~8,000톤/초에 달하므로 수문과 수차를 통해서 10,000톤 이상의 유량이 방류될 수 있음을 알 수 있다.

수문-수차 분리안의 경우, 현상태와 비교해서 수차 인근에서는 약 1~1.5km 전방에서의 유속과 유향이 어느 정도 바뀌는 특성이 나타나며, 낙조시 수문 전면 수로에서는 광범위하게 변화가 나타난다.

예상대로 낙조시 수문 전면에서의 유속 및 유향변화가 크게 나타나며, 남서향하던 낙조류가 보다 서향류로 바뀌는 특성이 나타나다. 수차 인근에서는 유속 변화가 상대적으로 작으나 수문 인근에서는 반경 약 500m 내에서의 유속은 낙조시기에 따라 차이가 있으나, 대체로 수십 % 이상 증가하는 특성이 나타난다.

인접안에서와 같이 만 내의 현상태에는 흐름이 없다가 발전소 가동시 만 내에 수십 cm/s 정도의 흐름이 형성되어 역시 발전소 가동 초기에 유동특성 변화로 인한 환경영향이 크게 나타날 것으로 예상된다.

LNG 기지 서쪽 끝 부근에서도 조류의 크기 및 방향이 크게 바뀐다. 즉, 창조시에는 현상태에 비해 만내로 유입되는 흐름으로 인해 동향 흐름이 강화되는 특성이 나타난다. 수문 북쪽 수로 및 인근 영역에서의 유속은 전반적으로 변화가 크다.

다. 발전소 가동에 따른 수위·유량특성

외해수위가 올라갈 발전소 가동에 따라 발전 외해측과 내해측의 수위, 수두차, 수문과 수차를 통과한 유량을 계산하였다.

발전에 따른 방류량은 독특한 커브 형태를 보이는 데 이는 특정 수두차 이상에서 유량이 선형적으로 비례 상승하지 않고 오히려 감소하는 수차특성을 반영

한다. 소조기에는 특정시간 동안 발전소 터빈이 가동되지 않는 특성이 잘 나타나 있으며, 두 안의 외형적 차이는 그림상으로 구분하기 어려우나, 두 안 모두 조석에 따른 조위차 변화에 대응하여 시화호 내측, 외해측, 수문과 수차를 통한 방류량의 변화 등이 잘 예측된 것을 알 수 있다. 발전소 가동 최적화와 결부된 조석시기에 따른 발전시작 수두차의 일반화 문제는 차후 고려해야 할 요소이다.

3.2 퇴적물이동 수치모형 실험

최적화 과정에서 도출된 적정시험용량을 채택하여 시화조력발전소를 건설 가동할 시에 시화호 및 시화방조제 전면 해역에 발생할 가능성이 있는 퇴적환경 변화를 예측하기 위하여 수치모형실험을 수행하였다.

수치모형 적용영역의 면적은 (그림 9)과 (그림 10)에 도시한 바와 같이 약 27km² 14km 정도이며 동서-남북방향으로 221 121개의 격자로 구성된다. 이러한 격자망 구성은 구면좌표계를 택하는 해수유동모형의 격자망을 따르므로 각 격자의 크기는 약간씩 다르나 대략 동서방향으로는 122.8m, 남북방향으로는 109~436m이다.

아울러 발전소 가동 전후의 해저잔단 응력 차이를 이용하여 사질퇴적물의 거동변화를 정성적으로 검토하였다.

3.2.1 적용모형 개요

적용모형은 다음과 같은 수심평균 평면2차원 이송 확산식을 근간으로 구성되며, 수치기법으로는 2차 풍 상차분법(second upwind scheme)을 이용한다.

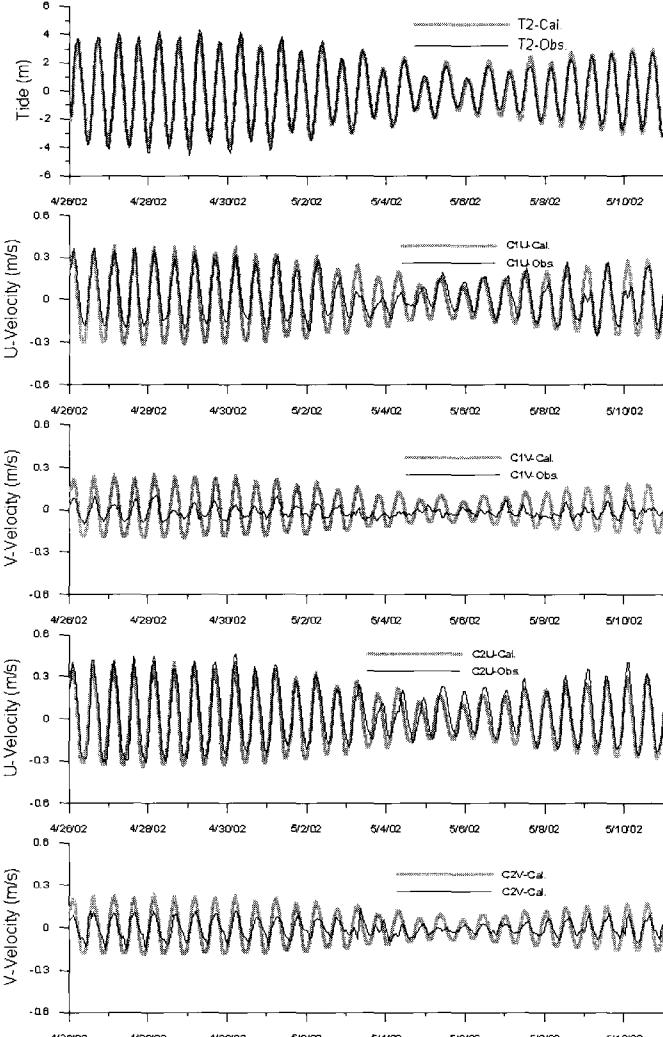


그림 8. 관측점 T2, C1, C2에서의 관측치(실선)와 계산치(점선) 비교

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} (hC) + \frac{\partial}{\partial x} (hUC) + \frac{\partial}{\partial y} (hVC) \\
 &= \frac{\partial}{\partial x} (hD_{xx} \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (hD_{xy} \frac{\partial C}{\partial y}) \\
 &+ \frac{\partial}{\partial y} (hD_{yx} \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (hD_{yy} \frac{\partial C}{\partial y}) \\
 &+ SSTERM \tag{3.4}
 \end{aligned}$$

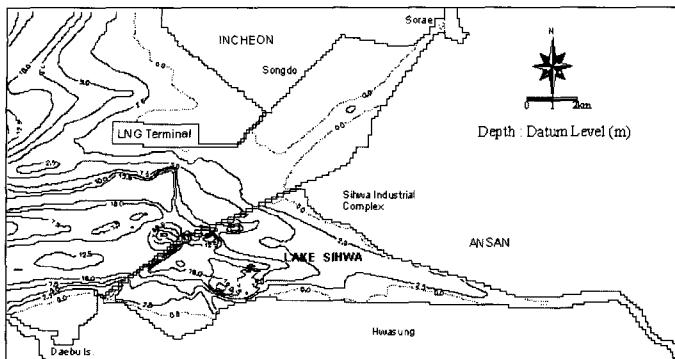


그림 9. 퇴적물 이동 수치모형실험 적용영역 주변 수심도

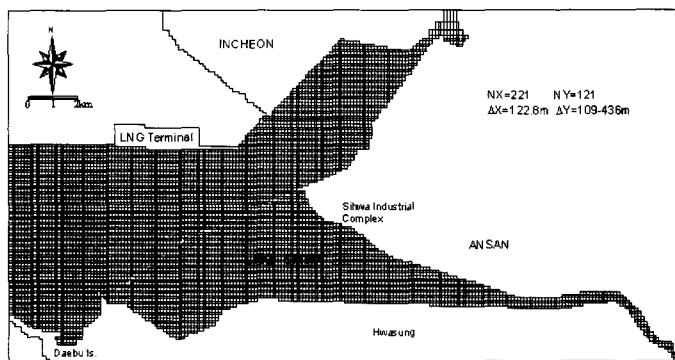


그림 10. 퇴적물 이동 수치모형 격자망도

여기서 t : 시간

x, y : 각각 동서, 남북방향 좌표

C : 수심평균농도

h : 총수심

SSTERM : 침식과 퇴적을 나타내는 sink/source

또한, D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} 및 D_{yy} 는 흐름의 가로 및 세로 방향 난류확산/분산계수의 기준축에 대한 tensor arguments이다.

3.2.2 적용조건

적용퇴적물 이동 및 지형변화 수치실험은 계산 중의 지형변화가 해수유동장에 미치는 영향을 반영하기 위하여 해수유동 수치모형실험과 연계하여 수행하여야 한다. 그러나 전술한 바와 같이 대상해역의 해저퇴

적물 입도 구성상 퇴적환경변화를 정량적으로 예측하는 것은 무리이므로 본 실험에서는 반정량적인 경향파악에 실험 목적을 두었으며, 이를 위해서는 해수유동모형과 연계하지 않아도 충분할 것으로 판단된다.

따라서 퇴적물 이동 수치실험 기간을 15일로 설정($t=18$ 초)하였으며, 실험시 필요해 수수 유동장은 앞 절의 해수유동 수치모형실험에서 계산된 30분 간격의 720 개 결과를 내삽(Lagrange interpolation)하여 이용하였다.

발전소 가동시의 강한 유속 증가로 인해 수치실험시 수차 구간은 크게 침식될 것으로 예상되어, 주변의 일정 격자는 퇴적은 허용되나 현상태 수심 이하로의 침식은 발생하지 않는 것으로 처리하였다.

3.2.3 적용결과

상기에 제시한 바와 같이 적용모형은 점성퇴적물 모형이며, 침식량 계산시 사

질 이하 퇴적물의 가중치를 적용하였다. 그러나, 영역 내 일부 구간은 사질 퇴적물 함유비가 50%를 넘으므로 이러한 지역을 포함한 대상해역의 전체적인 퇴적 환경 변화를 정성적으로 예측할 필요가 있어 이를 위하여 실험시 계산한 전단응력을 이용하였다.

먼저 시화조력발전소 가동 전에 대한 15일간 실행 과정에서 계산된 최대저면전단응력 분포를 그림 11에 제시하였다. 또한, 이러한 높은 전단응력에 의해 이 수로의 사질 입자 중앙입경은 그림 12에 제시한 바와 같이 최대 약 $400\mu\text{m}$ 이상이고, 발전소 가동 후의 조류에 의한 저면전단응력의 최대치를 그림 13에, 그리고 가동 전과의 차이를 그림 14에 제시하였다. 그림에 나타낸 바와 같이 발전소 가동에 따라 수문 서측은 서향 전단응력이, 동측은 동향 전단응력이 강화됨을 알 수 있으며, 이로 미루어 사질 퇴적물이 발전소 가동 후 수문을 중심으로 양분되어 이동할 것으로 예상된다.

점성퇴적물 이동 수치모형을 발전소 가동 전후에 대해 15일 동안 실행한 후의 저면 변화량을 그림 15와 그림 16에 제시하였다. 가동 전에 나타낸 LNG 인수기지 전면의 세립질 영역의 퇴적율이 상대적으로 높은 것으로 미루어 비록 정량적인 검증과정은 거치지 않았지만 본 수치모형이 대상해역의 현 퇴적작용을 잘 재현했다고 볼 수 있다.

가동 전·후의 퇴적율을 비교하면 먼저 시화호 외측의 경우, 발전소 인접부를 제외한 침식 퇴적영역의 전체적인 양상은 발전소 가동 전후가 유사하지만 발전소 동측 방조제 중앙부의 0mm 선을 중심으로 서측은 퇴적율이 감소하였으며, 동측은 증가함을 알 수 있다.

그러나 본 모형결과는 점성퇴적물에 국한되며, 또한 저면변화에 관한 현상태 검증을 거치지 않았음으로 정량적인 의미를 크게 부여해서는 안된다. 즉, 가동 후 퇴적율이 높아진 영역의 현재상태가 퇴적환경이라면 발전소 가동 후 현재보다 퇴적율이 증가할 가능성이 있는 것이며, 만일 현상태가 침식환경이라면 가동 후 그 침식율이 문화 내지 퇴적된다는 의미로 해석하여야 한다.

시화호 내부는 발전소 인접부를 제외한 거의 모든 영역에 15일 동안 약 1.5~2.5mm의 퇴적이 발생하였다. 이는 시화호 외측보다는 높은 퇴적율인 바, 발전소 구간의 침식 퇴적물이 유입됨과 아울러 퇴적한계전단응력 이하의 전단응력 지속시간이 시화호 외측에 비해 상대적으로 길기 때문으로 판단된다. 그러나 발전소 구간의 침식이 끊임 없이 지속되는 것은 아니므로 내부의 퇴적율은 우려할만한 수준은 아닌 것으로 판단된다. 시화호 내부 퇴적양상에서 특징적인 것은 발전소 남측의 퇴적율이 북측에 비해 높다는

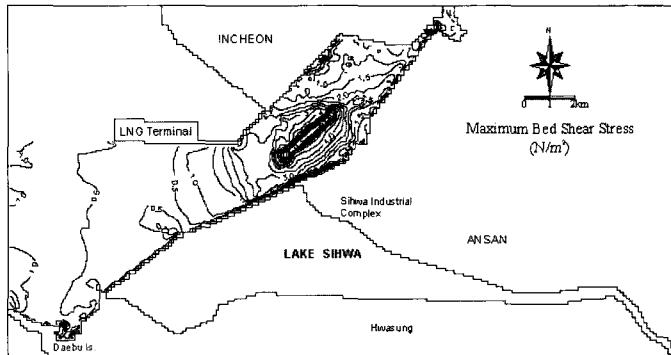


그림 11. 발전소 가동 전 조류에 의한 최대 저면전단응력 분포도

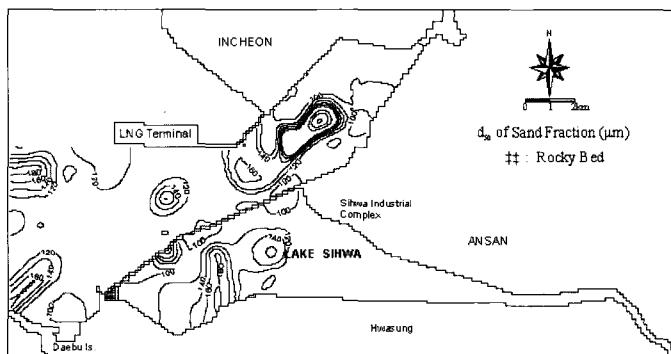


그림 12. 해저퇴적물 중 사질 이상 성분의 중앙입경 분포도

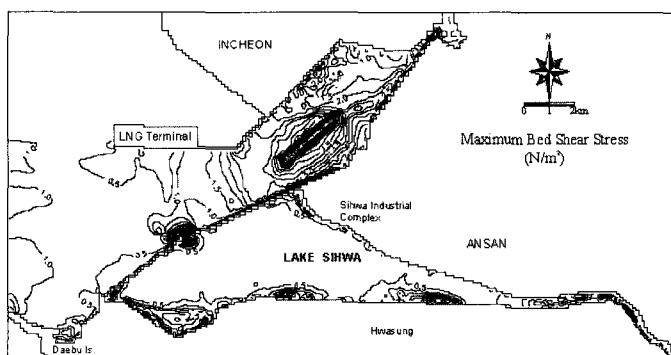


그림 13. 발전소 가동 후 조류에 의한 최대 저면전단응력 분포도

것이다.

금번 모형실험에서는 관측치의 부재로 인하여 퇴적물 이동량이 평상시에 비해 월등히 높은 동계 악기상 시나 하계 홍수시 조건이 포함되지 못하였다. 따라서 향후 실시설계단계에서는 이에 대한 장기 정밀조사를

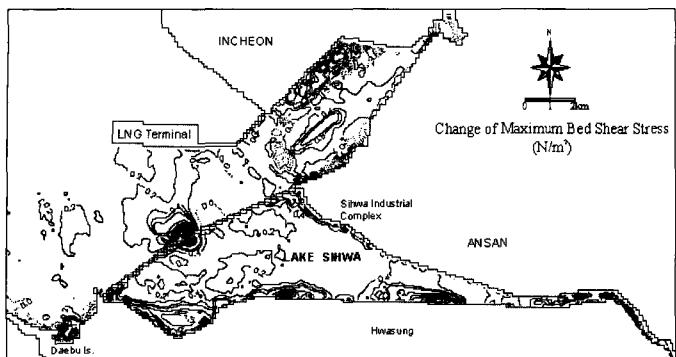


그림 14. 조류에 의한 최대 저면전단응력의 발전소 가동에 따른 변화 분포도

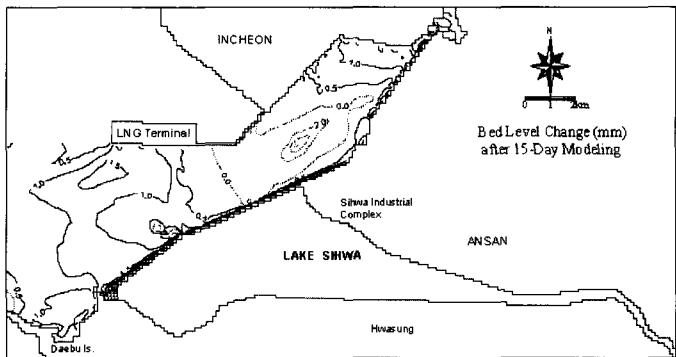


그림 15. 점성퇴적물 수치모형 15일 적용 후의 발전소 가동 전 해저면 변화

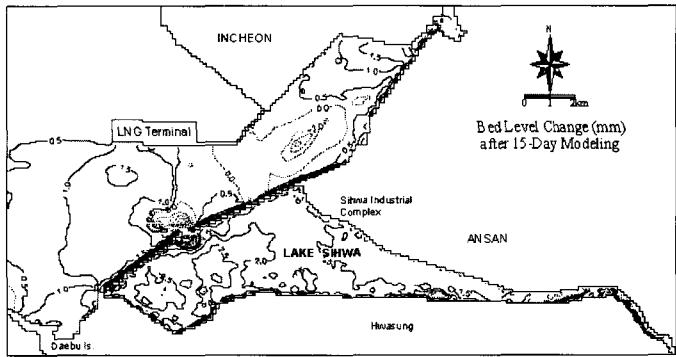


그림 16. 점성퇴적물 수치모형 15일 적용 후의 발전소 가동 후 해저면 변화

실시하여 모형실험에 반영하는 것이 정량적 예측의 신뢰성 제고를 위해 필요할 것이다.

3.3 오염물질 확산실험

3.3.1 입자추적 물질이동 확산모델 수립

물질의 이류·확산 연구를 위하여 입자 추적 모델링 기법은 기존의 유한차분 혹은 유한요소기법보다 여러 측면에서 장점이 있다. 특히 장시간 계산시 Numerical Scheme에 따라 발생할 수 있는 인위적인 감쇄(Artificial damping)에 의한 계산결과의 왜곡을 피할 수 있다.

1차적인 테스트 실험은 수립된 해수 유동 모델과 연계하여 매 time step마다 계산하였으며, 매 20분마다의 결과를 15일간 추적하는 실험을 실시하였으며, 대체로 이 해역에서 알려진 해수유동특성을 따라 유동특성을 보임을 확인하였다.

초기 투입입자는 시화호 내부에 각격자마다 수심에 비례하여 약 26,000여 개의 입자를 투입하였으며 수문과 수차가 가동되기 시작하는 조력발전소 가동 후부터 해수유동모델과 연계, 계산하여 초기 조건에 따른 시간별 변화를 평가하였다.

3.3.2 입자추적 물질이동 확산모델 적용

수문, 수차가 가동될 경우, 조력발전소가 초기 수문개방 시기동안에 내부 물질입자의 만외부로 어느 정도 유출되는지를 평가하기 위하여 조석 해수유동모델이 초기 Warming 계산 후 입자유동을 연계, 실험을 실시하였다.

또한, 수문배치에 따른 시화호 내 우월한 배치안을 평가하기 위한 구체적인 실험 방법으로서, 15일간 발전소 가동 후 시화호 내부의 전체 수질변화 및 발전소가동에 따른 해수교환에 따른 시화호 내 잔여 오염물 총량을 평가하기 위

한 실험을 실시하였다.

조력발전소 가동에 따라 시화호 상류 지점에서의 농도도 미약하나마 감소되고 있으며, 수 개월 이상 가동시 시화호 상류 영역에도 상당한 수질개선 효과가 있을 것으로 예상된다.

그 결과 수차·수문 인접안과 수차·수문 분리안의 조력발전소 15일 가동 후 최종적인 입자의 분포를 그림 17~18에 나타내었다.

시화호 내부에 있던 입자들이 발전소 가동에 따라 시화호 외부로 배출되고, 일단 배출된 입자들은 대체로 북쪽으로 이동하는 특성을 보인다. 일부 입자는 영종도 북쪽 수로를 거쳐 다시 외해쪽으로 남하한 특성을 보이고 있다. 또한, 외해측 인근에서의 분포가 두 안에 따라 얼마간의 차이를 보이나 보다 외해측에 서는 비슷한 특성을 보인다.

상기 계산결과를 고찰할 때, 조력발전소가 가동되는 경우, 수개월 이내에 만내의 수질은 외해수와 비슷하게 개선될 것으로 판단되며, 단 15일만에 만내의 오염부하량 75%가 외해로 방출될 경우 외해 환경에의 충격이 우려되므로 건설 후 운전 초기에는 일정기간 동안 부분운전을 통해 충격을 완화시킬 필요가 있다.

4. 생태계 영향

4.1 현황

4.1.1 조사방법

사업예정지구와 광역조사지역은 해안과 인접할 뿐만 아니라, 담수화된 시화호의 지형적 및 수리적 입지 특성을 최대한 반영하여 시화호로 유입되는 기수역과

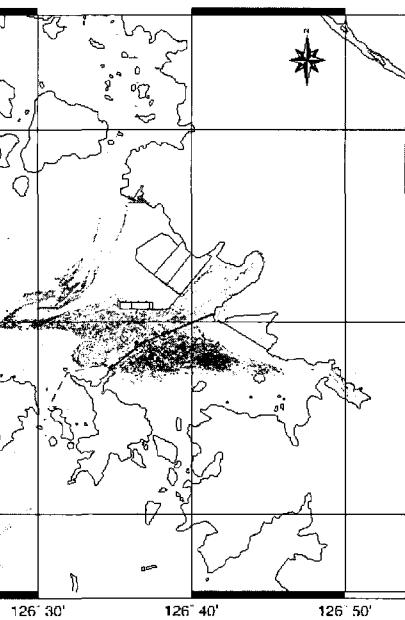


그림 17. 수차 수문 인접안 조력발전소 15일 가동후 입자의 분포

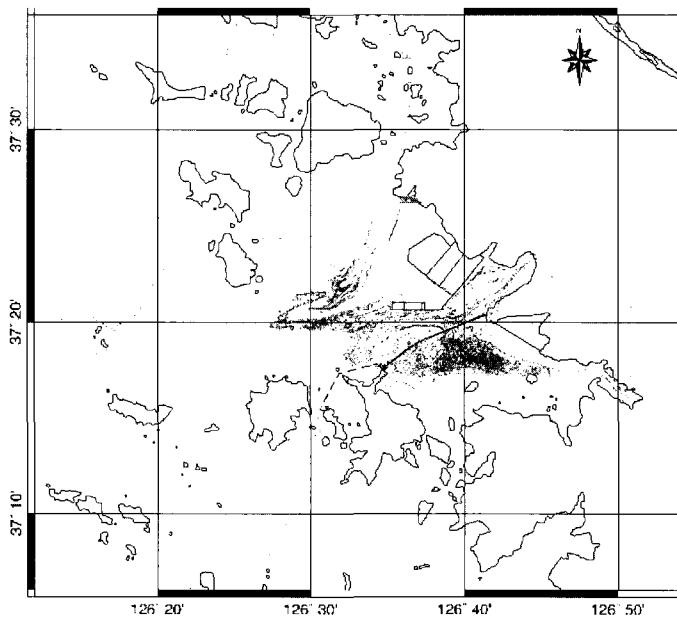


그림 18. 수차 수문 분리안 조력발전소 15일 가동후 입자의 분포

시화호를 중심으로 정성채집을 실시하였다. 또한, 기존의 환경부 문헌자료를 충분히 활용하여 서식 가능성이 높은 분류군을 예측하였다.

또한, 해안성 저서무척추동물은 연안지역의 환경오염을 나타내는 지표로 이용되며, 해안의 염생식물군락 및 조류의 분포와 매우 밀접한 관련이 있으므로 기존의 환경부 문현자료('00전국자연환경조사-“대부도(방아머리, 말부홍, 탄도)해안의 저서무척추동물”)를 분석하였다.

어류의 동정 및 분류는 김(1974)의 분류방식을 기본으로 하였으며, 납자루아과의 분류는 김(1982, 1986)의 방식, 그리고 모래주사속과 살치류의 분류는

김과 이(1982)의 분류방식을 채택하였다. 한편, 채집된 수서곤충류는 70% 알콜용액으로 고정하여 실험실에서 수서곤충검색도설(윤 1995)에 준하여 해부현미경상에서 분류 및 동정하였다.

계절적인 원인으로 현장조사시 관찰되지 않은 분류군은 사업예정지구 인근지역에 대한 기존의 환경부 문현자료를 최대한 인용하여 서식 가능성을 예측하였으며, 또한 현지조사자료와 비교 및 분석하였다.

어류는 족대와 어항을 이용하여 서식종을 확인하였



그림 19. 동물상 조사구역

다. 수서곤충류(저서성대형무척추동물 포함) 조사는 정성채집을 실시하였다.

4.1.2 조사결과

시화담수호 주변지역인 시화담수호 주변지역인 대부분, 시흥시, 안산시 및 화성군 일대의 해안지역은 대부 분 주거지, 대규모 산업단지, 경작지 및 과수원 등 인간 의 직접적인 경제활동이 왕성한 물리적 교란지역이다. 따라서, 조류를 제외한 육상동물은 주거지와 경작지 및 인근 산림을 서식지로 활용하는 생태적 지위(niche)가 낮은 소형동물인 것으로 판단 및 조사되었다.

한편, 시화호의 간척지에는 현재 갈대군락과 억새 군락이 매우 넓은 분포역을 점유하고 있으며, 간척지 범에 발달한 수변구역은 조류의 서식처, 휴식처, 신란처, 체온유지처, 먹이공급처, 피난처 및 은신처 등의 생물서식공간(biotope)을 제공하며, 조류의 먹이원이 되는 저서성무척추동물(수서곤충류 포함)을 공급해 주는 것으로 알려져 있다.

표 4. 조사지역의 동물상목록 집계표

구 분	현 지 조 사		문 헌 조 사		비 고
	출 현 종 수	우 점 종	출 현 종 수	우 점 종	
포 유 류	5 과 7 종	등줄쥐, 멧토끼	9 과 15 종	멧토끼, 등줄쥐	
양 서 류	3 과 3 종	참개구리	3 과 5 종	참개구리	
파 층 류	2 과 2 종	유혈목이	2 과 3 종	유혈목이	
조 류	13과21종	청둥오리, 괭이갈매기, 흰뺨검둥오리	II III IV V	21과53종 24과47종 34과124종 15과37종	북방쇠종다리, 청동오리 청동오리, 흰뺨검둥오리 청동오리, 흰뺨검둥오리 청동오리, 흰뺨검둥오리
곤 층 류	6 과 9 종	무당벌레, 왕귀뚜라미	VI	38과63종	나비목, 딱정벌레
어 류	2 과 4 종	붕어	I	5 과 15 종	붕어, 미꾸리, 갈겨니
저 서 성 대 형 무 척 주 동 물	5 과 7 종	물달팽이	I	23과40종	하루살이류, 물달팽이
해안성무척추동물	-	-	VII	16과19종	쏙, 개맛, 갈개, 자주새우

문헌자료) I : '99전국자연환경조사 용인 화성의 자연환경. 2000. 환경부

II : '01겨울철 조류동시센서스 - "시화호일대". 2001. 환경부

III : '00겨울철 조류동시센서스 - "시화호일대". 2000. 환경부

IV : '99경기도 연안습지생태계 기초조사 - "시화호일대". 2000. 경기개발연구원

V : '99겨울철 조류동시센서스 - "시화호일대". 1999. 환경부

VI : 신길~안산고속도로확 포장사업 경영평가서. 1996. 한국도로공사

VII : '00전국자연환경조사 대부도(방아머리, 말부총, 단도)해안의 저서무척추동물. 2001. 환경부

이러한 이유로 현재 시화방조제(작은가리섬)로부터 동측으로 약 22km이격된 수변구역(시화생태공원)에 형성된 갈대군락에는 많은 조류가 도래하거나 서식하고 있으며, 국내에 도래하는 겨울철새의 주요 월동지로 이용되고 있다. 한편, 시화생태공원의 최동단에는 안산시와 화성군으로부터 동화천, 반월천, 삼화천 등이 발달하고 있다.

따라서, 현지조사와 문헌조사로 확인된 시화호 일원의 육상 육수동물상은 표 4와 같으며, 현지조사 및 문헌자료 분석에 따른 환경부고시 법적보호종은 그들의 생태 및 생육특성을 기술하여 서식 가능성을 예측하는 기본자료로 활용하였다.

가. 육상동물상

1) 포유류

④ 현지조사 출현종

시화호 일원의 경작지, 하천 및 산림 등에서 직접 관찰, 굴흔적, 족흔, 배설물 및 청음 등을 통해 두더지, 족제비, 멧토끼, 청설모, 다람쥐, 등줄쥐 및 집쥐

등 총 5과 7분류군이 조사되었다.

④ 문헌자료 분포종

환경부 문헌자료('99전국자연환경조사 용인 화성의 자연환경 - "용인 화성, 석성산 일대의 포유류")를 분석한 결과에 따르면 고슴도치, 너구리, 오소리, 족제비, 멧돼지, 노루, 고라니, 다람쥐, 등줄쥐 및 집쥐 등 총 9과 15분류군이 서식하는 것으로 분석되었다(부록-동 식물상목록).

⑤ 환경부고시 법적보호종

현지조사 및 문헌자료 분석에 따른 법적보호종은 생육하지 않는 것으로 확인되었다.

2) 양서 파충류

ⓐ 현지조사 출현종

현지조사는 계절적인 원인으로 인하여 사업예정지 구와 주변지역의 양서 파충류는 관찰되지 않았다. 그러나, 사업예정지구를 포함하는 시화호 일원은 경작지, 농수로, 지방하천 및 수변구역 등의 발달이 매우 양호한 입지환경에 있으므로 무당개구리, 청개구리, 참개구리, 음개구리, 도롱뇽 등은 서식 가능성은 비교적 높을 것으로 사료된다. 또한, 인근 지역민을 대상으로 실시한 탐문조사에 따르면 양서류는 무당개구리, 참개구리, 청개구리 3분류군, 파충류는 유형목이, 줄장지뱀 2분류군이 서식하고 있다.

ⓑ 문헌자료 분포종

문헌자료('99전국자연환경조사 용인 화성의 자연환경 - "용인 화성지역의 양서 파충류") 분석에 따르면 양서류는 두꺼비, 청개구리, 아무르산개구리, 참개구리 및 음개구리 등 총 3과 5분류군, 그리고 파충류는 유혈목이, 쇠살모사, 살모사 등 총 2과 3분류군으로 조사되었다(부록-동 식물상목록).

ⓓ 환경부고시 법적보호종

현지조사 및 문헌자료 분석에 따른 법적보호종은 생육하지 않는 것으로 확인되었다.

3) 조류

ⓐ 현지조사결과

현지조사시 시화방조제, 시화호안, 시화생태공원, 대부도수변구역의 갈대군락과 염생초지 등에서 관찰된 조류상은 흰뺨검둥오리, 청둥오리, 바다비오리, 비오리, 혹부리오리, 팽이갈매기, 알락할미새, 백할미새, 왜가리, 중대백로 및 쇠백로 등의 수조류가 목록되었으며, 시화호 일원의 구릉성 산림, 경작지, 산록의 덤불 및 갈대군락 등에서 꿩, 멧비둘기, 직박구리, 딱새, 붉은머리오목눈이, 오목눈이, 박새, 멧새, 노랑턱멧새, 참새, 까치, 까마귀 등 총 13과 21분류군이 조사되었다. 현지조사결과, 시화호 일대의 수변지역에서 조사된 오리류는 겨울철에 월동하기 위해 도래한 철새류이며, 이들 철새들은 시화방조제 수문개방 이후 시화호의 수질이 개선되고 먹이원인 수초 및 저서성무척추동물의 증가로 인해 시간이 경과됨에 따라 출현종수 및 개체수는 다소 증가추세에 있다. 한편, 주변의 경작지와 인근 산림 등에서 관찰된 분류군은 전국적으로 흔히 분포하는 벗새류로 조사되었다.

ⓑ 문헌조사결과

환경부 문헌자료('99~01겨울철 조류동시센서스 - "시화호일대")를 분석한 결과, 시화호 일원에서 조사된 겨울철 조류상은 1999년에는 15과 37분류군, 2000년은 24과 47분류군, 그리고 2001년에는 21과 53분류군으로 조사되었다(부록-동 식물상목록). 한편, 경기개발연구원 문헌자료('99경기도 연안습지생태계 기초조사)를 분석한 결과에 따르면 총 34과 124분류군이 서식하거나 도래하는 것으로 나타났다. 한편, 문헌자료 분석결과에 따른 시화호 일대에 도래하는 겨울철새는 뿔논병아리, 민물가마우지, 쇠가마우지, 오리류, 수리류, 메추라기, 두루미류, 물떼새류, 도요류, 갈매기류 및 할미새류 등 총 52분류군으로 분석되었으며, 이들 겨울철새류 중에서 청둥오리, 흰뺨검둥오리, 흰죽지 3분류군이 개체수에 있어서 우점종으로 나타났으며, 현지지조사 및 문헌자료에 따르면 이들 분류군은 주로 시화호 중앙부에 무리를 이루거나, 갈대군락이 형성된 수변지역에 휴식하고 있

는 것으로 조사되었다. 또한, 여름철새는 텃새화된 백로류 등을 제외하고 해오라기, 물닭, 꼬마물떼새, 깍작도요 및 제비 등 총 24분류군으로 분석되었다.

④ 조류현황 분석

현지조사 및 문헌조사로 유형화된 조류목록집계표를 분석하면, 겨울철새와 텃새의 도래 및 서식빈도가 매우 높았다(표 5.1.3-9). 특히, 2000년의 문헌자료 조류상은 총 21과 26분류군 171,202개체였으며, 겨울철새는 26분류군으로 청동오리(44,923개체), 환BMW청동오리(42,688개체), 흰죽지(17,150개체) 등 3분류군이 우점 및 도래하였고, 또한 나그네새인 북방쇠종다리(47,471개체)가 풍부하게 출현하는 것으로 분석되었다.

⑤ 환경부고시 법적보호종

현지조사시 법적보호종은 확인되지 않았으나, 문헌자료(I, II, III, IV)를 분석한 바에 따르면 법적보호조류는 총 25분류군이 도래하거나 분포하는 것으로 나타났다(부록-동 식물상목록).

4) 육상곤충류

① 현지조사 출현종

계절적인 원인으로 관찰된 육상곤충상은 매우 빈약하였으나, 현지조사시 왕귀뚜라미, 무당벌레, 꽃등에, 뿔나비 및 네발나비 등 총 6과 9분류군이 목측되었다.

② 문헌자료 분포종

문헌자료('96신갈~안산고속도로 확장사업 경영

향평가서, 한국도로공사) 분석에 의하면 하루살이, 솔나방, 독나방, 호랑나비, 산제비나비, 배추흰나비, 푸른부전나비, 뿔나비, 도토리노린재, 알락수염노린재, 붉은잡초노린재, 말매미, 참매미, 풍뎅이, 꽃무지, 칠성무당벌레, 무당벌레, 벼들잎벌레, 말벌, 땅벌, 호박벌, 꿀벌, 꽃등에, 집파리, 밀잠자리, 귀뚜라미, 방아깨비, 풀무치, 여치 및 큰집계벌레 등 총 38과 63분류군으로 확인되었다(부록-동 식물상목록).

⑥ 환경부고시 법적보호종

현지조사 및 문헌자료 분석에 따른 법적보호종은 생육하지 않는 것으로 확인되었다.

나. 육수동물상

1) 어류

① 현지조사 출현종

시화호 일원의 기수역(동화천, 반월천, 삼화천 등)에서 봉어, 떡봉어, 밀어 및 갈문망둑 등 총 2과 4분류군이 조사되었다.

② 문헌자료 분포종

문헌조사('99전국자연환경조사 용인 화성의 자연환경-' 용인 화성, 석성산 일대의 담수어류") 결과로는 봉어, 떡봉어, 잉어, 돌마자, 벼들치, 모래무지, 참봉어, 피라미, 미꾸리, 얼룩동사리 및 밀어 등 총 5과 15분류군이 분포하는 것으로 분석되었다(부록-동 식물상목록).

표 5. 시화호 일대의 조류목록집계표

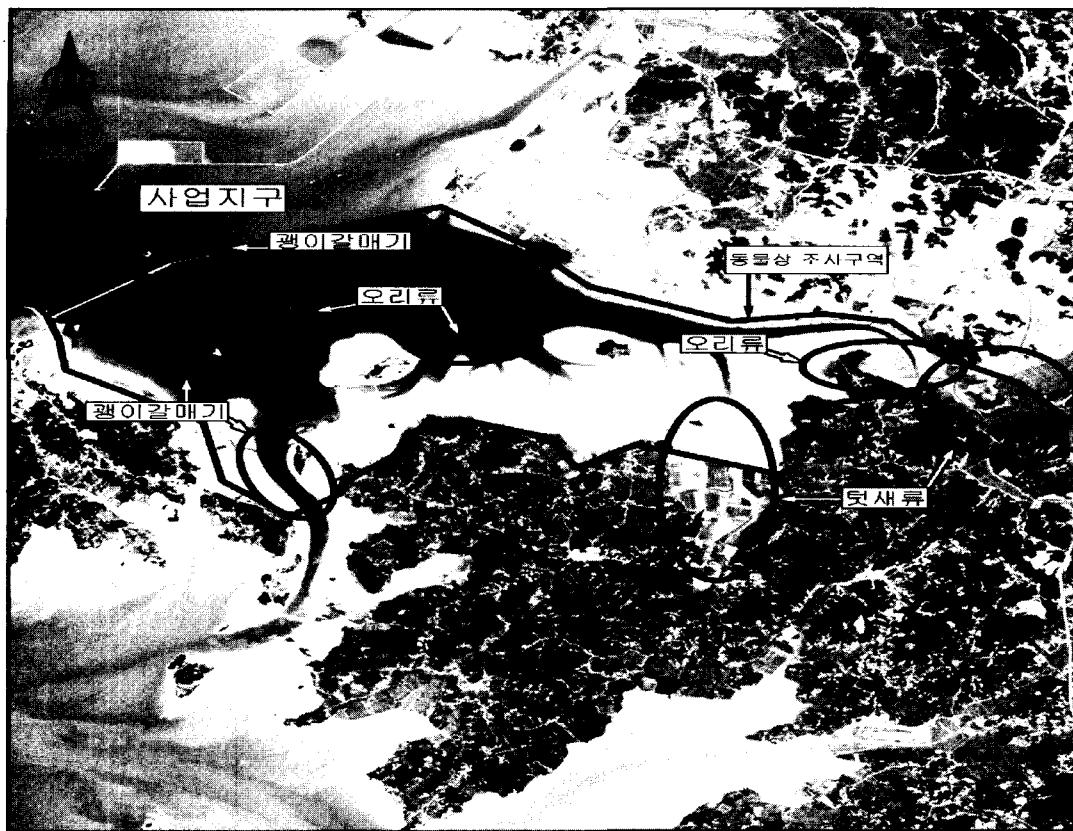
구 분	현 지 조 사	문 현 조 사			
		I	II	III	IV
출 현 종 수	총 13과 21종	총 21과 53종	총 24과 47종	총 34과 124종	총 15과 37종
겨 을 철 새	2종	26종	26종	47종	19종
여 름 철 새	2종	1종	3종	29종	4종
텃새 및 나그네새	17종	23종	27종	48종	15종

문헌자료 I : '00겨울철 조류 동시센서스 - "시화호 일대". 2001. 환경부.

문헌자료 II : '99겨울철 조류 동시센서스 - "시화호 일대". 2000. 환경부.

문헌자료 III : '99경기도 연안습지생태계 기초조사 - "시화호 일대". 2000. 경기개발연구원.

문헌자료 IV : '98겨울철 조류 동시센서스 - "시화호 일대". 1999. 환경부.



범례

오리류 : 흑놀오리, 흰뺨검둥오리, 흰启迪 꽃새류 : 백로류, 경작지 및 산림서식소류 (): 개체군 채식지 및 휴식지

0 2 4 8km

그림 20. 시화호 일대의 조류분포현황

(④) 환경부고시 법적보호종

현지조사 및 문헌자료 분석에 따른 법적보호종은 생육하지 않는 것으로 확인되었다.

2) 저서성대형무척추동물(수서곤충류 포함)

⑦ 현지조사 출현종

현지조사결과, 실지렁이, 돌거머리, 물달팽이, 왼돌이물달팽이 및 먹파리류 등 총 5과 5분류군이 조사되었다.

(④) 문헌자료 분포종

문헌자료("99전국자연환경조사 용인 화성의 자연환경 - "용인 화성, 석성산 일대의 저서성대형무척추동물")를 인용한 결과에 따르면 실지렁이류, 돌거머리, 주름다슬기, 물달팽이, 옆새우류, 등줄실잠자리, 쇠축실잠자리, 하루살이류, 날도래류, 각다귀류 및 깔따구류 등 총 23과 40분류군이 분포하는 것으로 나타났다(부록-동 식물상목록).

④ 환경부고시 법적보호종

현지조사 및 문헌자료 분석에 따른 법적보호종은 생육하지 않는 것으로 확인되었다.

다. 해안저서성무척추동물

해안저서성무척추동물은 시화호에 서식하는 조류의 중요한 먹이원이므로 환경부 문헌자료를 분석하였다. 따라서, 대부도 남동쪽 해안의 3개 조사지점에서 채집된 해안저서성무척추동물상은 총 16과 19분류군이었으며, 이들 분류군에 대한 특징과 각 조사지점의 생

표 6. 시시화호 일대의 환경부고시 법적보호종 현황

구 분	분 류 군	멸종위기종	보 호 종	천연기념물	비 고
포 유 류	-	-	-	-	-
양 서 류	-	-	-	-	-
파 총 류	-	-	· -	-	-
조 류	• 알락해오라기	-	○	-	문현(Ⅰ,Ⅱ)
	• 큰기러기	-	○	-	문현(Ⅰ,Ⅲ)
	• 가창오리	-	○	-	문현(Ⅲ,Ⅳ)
	• 큰고니	-	○	○	문현(Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ)
	• 붉은배새매	-	-	○	문현(Ⅲ)
	• 새매	-	-	○	문현(Ⅲ)
	• 조롱이	-	○	-	문현(Ⅲ)
	• 참매	-	○	-	문현(Ⅲ)
	• 흰죽지수리	-	○	-	문현(Ⅲ,Ⅳ)
	• 말똥가리	-	○	-	문현(Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ)
	• 개구리매	-	○	○	문현(Ⅰ,Ⅲ)
	• 젯빛개구리매	-	○	○	문현(Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ)
	• 알락개구리매	-	○	○	문현(Ⅰ,Ⅱ)
	• 흰꼬리수리	-	○	○	문현(Ⅲ,Ⅳ)
	• 물수리	-	○	-	문현(Ⅰ,Ⅲ,Ⅳ)
	• 큰말똥가리	-	○	-	문현(Ⅲ)
	• 틸발말똥가리	-	○	-	문현(Ⅲ)
	• 매	○	-	○	문현(Ⅲ)
	• 황조롱이	-	-	○	문현(Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ)
	• 흑두루미	-	○	○	문현(Ⅲ)
	• 재두루미	-	○	○	문현(Ⅰ)
	• 뜰부기	-	○	-	문현(Ⅲ)
	• 검은머리풀떼새	-	○	○	문현(Ⅰ,Ⅲ)
	• 알락꼬리마도요	-	○	-	문현(Ⅲ)
	• 검은머리갈매기	-	○	-	문현(Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ)
곤 총	-	-	-	-	-
어 류	-	-	-	-	-
저서성대형무척추동물	-	-	-	-	-

주) 문헌자료 : '99전국자연환경조사 용인 화성의 자연환경. 2000. 환경부.

조류문헌자료Ⅰ : '00겨울철 조류동시센서스 - "시화호 일대". 2001. 환경부.

조류문헌자료Ⅱ : '99겨울철 조류동시센서스 - "시화호 일대". 2000. 환경부.

조류문헌자료Ⅲ : '99경기도 연안습지생태계 기초조사 - "시화호 일대". 2000. 경기개발연구원.

조류문헌자료Ⅳ : '98겨울철 조류동시센서스 - "시화호 일대". 1999. 환경부.

태특징을 열거하면 다음과 같다.

1) 방아머리

방아머리는 시화호의 시화방조제 서쪽 끝단에 위치하며, 이미 육화가 이루어져 육지와 인접한 지역은 갈개만이 발견되었다. 육지쪽으로부터 갈대군락이 호수 쪽으로 침입되어가고 있음이 목측되었다.

2) 말부홍

말부홍 해안의 저질은 모래와 펄이 혼합된 갯벌로 서 바지락양식이 성행하고 있어 주민들의 고소득원이 되고 있다. 이곳은 속이 우점하고 있고 아우점종은 개맛으로 나타났다.

3) 탄도

탄도의 갯벌 표면은 돌과 자갈로 이루어져 있어 이들에 굴이 다량 부착되어 있고 그 밑층은 저질이 개펄을 이루어 눈썹참갯지렁이, 속, 자주새우 등이 혼생하고 있다.

라. 환경부고시 법적보호종 현황

1) 현지조사 법적보호종

사업예정지구를 포함하는 시화호 일대의 동물상조사자료를 확인한 바에 의하면 법적보호종은 분포하지 않는 것으로 조사되었다.

2) 문현조사 법적보호종

문현자료 분석결과에 따르면, 다수의 법적보호조류가 서식하거나 도래하는 것으로 확인되었다. 즉, 천연기념물은 큰고니, 붉은배새매, 새매, 개구리매, 잿빛개구리매, 알락개구리매, 흰꼬리수리, 매, 황조롱이, 흑두루매, 재두루미 및 검은머리물떼새 등 12분류군, 멸종위기야생조류는 매 1분류군, 그리고 보호야생조류는 알락해오라기, 큰기러기, 가창오리, 큰고니, 조롱이, 참매, 흰죽지수리, 말똥가리, 개구리매, 잿빛개구리매, 알락개구리매, 흰꼬리수리, 물수리, 큰말뚱가리, 텔빌말뚱가리, 흑두루미, 재두루미, 뜰부기, 검은머리물떼새, 알락꼬리마도요 및 검은머리갈매기 등

21분류군이며, 시화호일대의 법적호조류는 총 25분류군으로 분석되었다

4.2 예측결과

4.2.1 공사시

가. 육상 육수동물상에 미치는 영향예측

1) 포유류

현지조사시 확인된 포유류는 두더지, 족제비, 맷토끼, 청설모, 다람쥐, 등줄쥐 및 집쥐 등 총 7분류군은 시화방조제를 주요 서식처로 활용하고 있지 않으며, 이들 분류군은 시화호 일대의 산림, 경작지, 주거지 및 지방하천 등에 분포하므로 사업시행시 미치는 영향은 거의 없을 것으로 예측되었다.

2) 양서 파충류

현지조사시 계절적인 원인으로 관찰되지 않았으나, 시화호 일대의 입지환경을 고려할 경우 무당개구리, 청개구리, 참개구리, 도롱뇽, 유혈목이 및 줄장지뱀 등은 서식 가능성은 비교적 높을 것으로 예측되었다. 그러나, 이들 분류군의 생육입지는 경작지, 수변구역 이므로 사업시행시 미치는 영향은 거의 없을 것으로 예측되었다.

3) 조류

현지조사시 총 21분류군의 조류가 목측되었고, 시화담수호와 인근해역에는 팽이갈매기, 청둥오리, 흰뺨검둥오리 등의 채식 및 휴식처가 위치하고 있으므로 사업시행으로 발생하는 소음 및 유출토사는 이들 조류의 휴식지 및 채식지가 영향을 받을 것으로 예측되었다. 따라서, 공사차량 및 중장비에서 발생하는 소음과 사업시행시 토사유출을 최대한 저감하는 현실적인 저감방안이 필요할 것으로 사료되며, 이들 오리류는 시화호 중앙의 수역에 분포하는 것이 아니라 시화호 최동측의 수변구역을 주요 도래지, 채식처로 이용할 것으로 예측되므로 미치는 영향은 거의 없을 것으로 예상된다.(표 7, 그림 21 참조)

4) 육상곤충류

시화호 일대의 입지환경을 고려할 경우에 분포하는 육상곤충류는 대부분 주변지역에서 일반적으로 흔히 관찰되는 분류군일 것으로 예측되는 바, 사업시행에 따른 영향은 거의 없을 것으로 예측되었다.

5) 담수어류

시화호 일원의 기수역(동화천, 반월천, 삼화천 등)에 대한 현지조사시 봉어, 떡붕어, 밀어 및 갈문망둑

등 총 4분류군이 조사되었다. 따라서, 본 기수역은 작은가리섬을 중심으로 약 22km이격된 최동측에 위치하며, 사업시행시 기수역에 서식하는 어류에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 예측되었다.

6) 수서곤충류(저서성대형무척추동물 포함)

계절적인 원인으로 기수역(동화천, 반월천, 삼화천 등)에 대한 현지조사시 확인된 수서곤충상은 봉어, 떡붕어, 밀어 및 갈문망둑 등 총 4분류군으로 사업시행

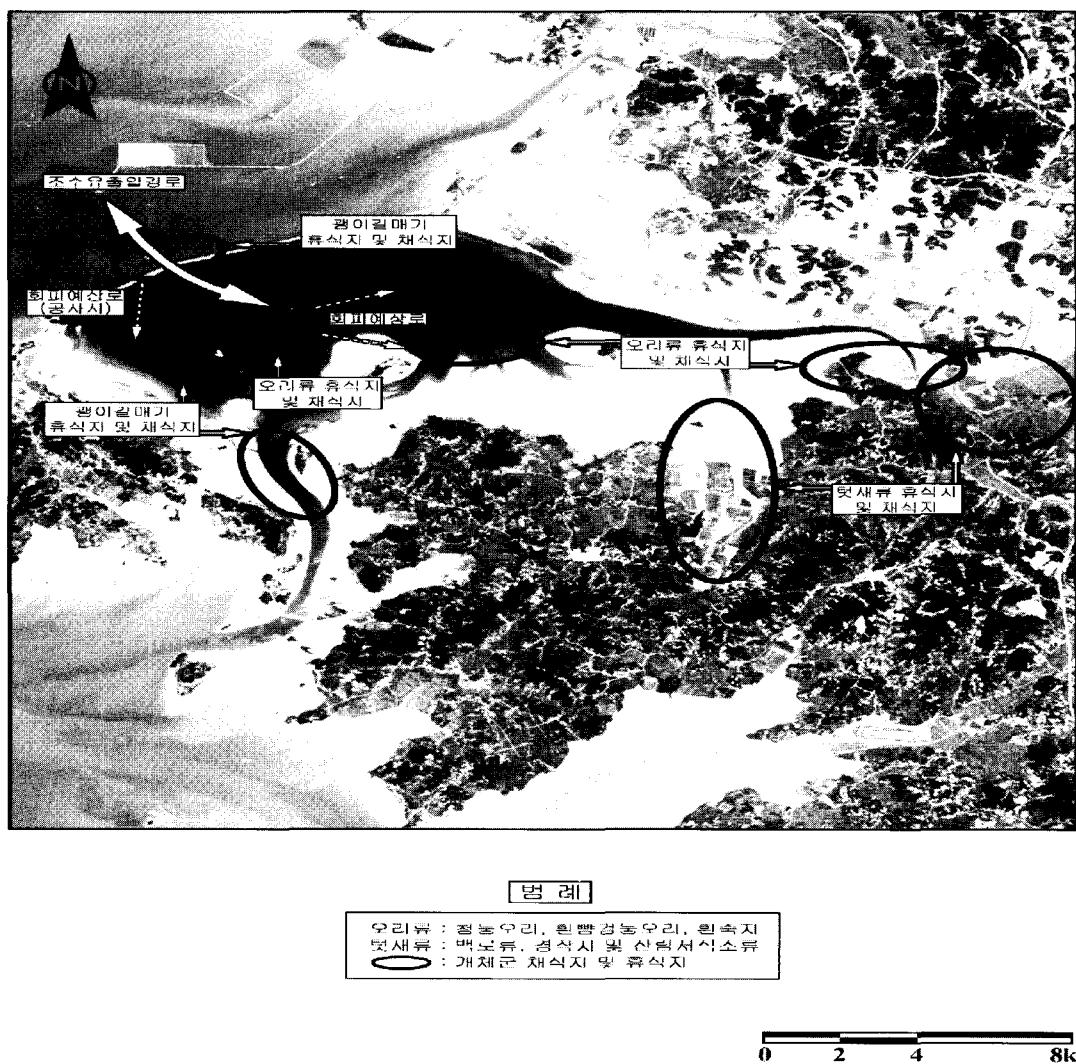


그림 21. 사업시행에 따른 조류분포변화의 예측

표 7. 사업시행이 서식조류에 미치는 영향

분류군	분포역	산란시기 (도래시기)	채식지 및 휴식지 훼손	토사유출	소음	비고
백로류	경작지, 하천, 호수	4~8월(텃새)	-	-	-	-
꿩	경작지, 산기슭	5~6월(텃새)	-	-	-	-
오리류	경작지, 하천, 호수	(텃새)	☆☆	☆☆	☆☆☆	-
갈매기류	해안, 하구, 강	(텃새)	☆☆☆☆	☆☆	☆☆☆	-
붉은 배 새 매	숲-평지	5월(5~9월)	-	-	-	문현분포종
새매	번식기-산림 기타-평지, 마을	5월(텃새)	-	-	-	문현분포종
새출리기	전역	5~6월(5~9월)	-	-	-	문현분포종
황조롱이	전역	3~5월(텃새)	-	-	-	문현분포종
소쩍새	전역	5~6월(텃새)	-	-	-	문현분포종
멧비둘기	산림, 경작지	5~6월(텃새)	-	-	-	-
제비	경작지, 주거지	4~7월(여름새)	-	-	-	문현분포종
직박구리	산림, 경작지	5~6월(텃새)	-	-	-	-
활미새류	하천, 호수	4~8월(텃새화)	-	-	-	-
때까치류	경작지, 하천	4~8월(텃새화)	-	-	-	-
왜가리	경작지, 하천, 호수	4~8월(텃새화)	-	-	-	-
붉은 머리오목눈이	전역	4~7월(텃새)	-	-	-	-
박새류	전역	4~7월(텃새)	-	-	-	-
까치	전역	2~5월(텃새)	-	-	-	-

주) ☆ : 매우 미약, ☆☆ : 미약, ☆☆☆ : 보통, ☆☆☆☆ : 심함, ☆☆☆☆☆ : 매우 심함

시 기수역에 서식하는 수서곤충류에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 예측되었다.

나. 토사유출이 시화호의 수생태계에 미치는 영향

예측

1) 발전소부지와 수문 입지는 작은가리섬 지하부와 시화방조제의 일부구간이므로 사업시행시 유수 방향을 고려할 경우에 시화담수호에 미치는 영향은 매우 적을 것으로 예측되었다. 그러나, 작은가리섬 지소에 발전소를 건설하는 공사시 채굴되는 토사를 주변지소에 적하시킬 경우, 하절기 집중강수시는 수생태계에 적 간접적인 영향이 미칠 것으로 예측되었다.

2) 따라서, 작은가리섬 채굴작업시 수역으로의 토사유출은 시화호와 해수역 생태계의 물리적 교란에 따른 탁도증가로 인하여 육수동물상(어류,

수서곤충류, 부착조류, 저서성대형무척추동물, 플랑크톤 등)의 호흡장애 등을 유발하여 수생태계의 일시적인 교란이 예상된다.

3) 부유물질의 농도가 25mg/l 이하에서는 어류에 미치는 영향은 거의 없으나, $80\sim400\text{mg/l}$ 이상의 고농도에서는 어류에 피해가 발생한다고 알려져 있다(Albaster and Lloyed 1991). 한편, 강우시 토사유출에 따른 SS가중치는 600mg/l 로 예측되어 하천생태계에 영향이 클 것으로 예측되었다. 또한, 부유물질이 증가하면, 플랑크톤과 미생물이 증가될 것으로 예상됨에 따라 사업시행시 적절한 저감방안이 수립되어야 할 것으로 사료된다.

4) 해양저서무척추동물 : 1997년 한국수산학회지 30(5) 참고문헌(시화방조제의 건설이 해양저서

동물군집의 시 공분포에 미치는 영향(홍재상)을 조사한 결과, 시화호에 분포하는 저서무척추동물의 분포는 시화방조제건설 이후에 그 분포역이 점차 감소하여 시화호 주변의 수심이 낮은 지역에 국한되는 것으로 조사되었다. 이와 같은 현상은 안산시 및 반월공단 등으로부터 유입된 유기 물의 퇴적에 의해 시화호 저층의 무산소화가 초래되었기 때문으로 해석되고 있다. 한편, 배수문 인근의 지역에 출현하는 저서무척추동물상은 수문개방이후 점차 다양화되고 있는 것으로 나타나서, 시화호의 저서동물상이 해수의 유출입에 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서, 조력발전소의 운영으로 발생하는 대규모 해수유출입로의 변화는 시화호내의 저서무척추동물의 다양성과 생태에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

5) 플랑크톤 : 시화호는 방조제 공사후 표층수와 저층수가 분리되어 있으며, 염분약층으로 형성된

성층으로 표층수와 저층수가 혼합되지 않고 있다. 따라서, 저층수는 정체된 상태이며, 표층수의 경우는 하천으로부터 유입된 영양염류에 의해 쉽게 식물플랑크톤의 대량증식현상이 나타나고 있다. 따라서, 공사시 발생하는 토사가 시화호로 유입될 경우, 부영양화로 인한 적조 등과 같은 현상이 쉽게 발생할 수 있으므로 이에 대한 저감방안이 요구되어 진다.

6) 한편, 시화호의 부영양화와 오염경로를 예측하는 모식도와 육수동물상에 미치는 영향은 각각 그림 22와 표 8과 같다.

다. 환경부고시 법적보호종에 미치는 영향예측

- 1) 현지조사시의 육상 육수동물상자료를 분석한 바에 따르면 법적보호종은 분포하지 않는 것으로 나타났다.
- 2) 그러나, 조사지역의 입지환경을 고려한 문헌자

표 8. 사업시행이 주요 육수동물상에 미치는 영향

분류군	서식장소 (먹이원)	산란시기 (산란장소)	서식지 훼손여부	이동로 단절여부	토사유출	비고
붕어	전 하천(잡식성)	4~7월(수초)	-	-	☆	-
잉어	강, 호수, 저수지(잡식성)	5~6월(자갈)	-	-	☆	-
버들치	깨끗한 하천, 어울(잡식성)	5~6월(자갈)	-	-	☆☆☆	-
모래무지	하천의 중 하류 모래(수서곤충)	5~6월(모래)	-	-	☆☆☆	-
피라미	하천 중 하류(잡식성)	6~8월(자갈)	-	-	☆☆☆	-
미꾸리	연못, 저수지, 농수로(잡식성)	4~7월(진흙, 모래)	-	-	☆☆☆	-
밀어	하천, 호수, 늪(잡식성)	5~6월(자갈)	-	-	☆☆☆	-
돌고기	유속이 완만하고 자갈 깔인 하천(잡식성)	5~6월(모래 자갈)	-	-	☆☆	-
동사리	중상류(육식성)	봄~초여름(중상류)	-	-	☆	-
지령이류	진흙 지역	-	-	-	☆	-
패류	모래, 실크질 지역	-	-	-	☆	-
하루살이류	얇은 여울의 하상	-	-	-	☆☆	-
잠자리류	얇은 여울의 하상	-	-	-	☆☆	-
날도래류	얇은 여울의 하상	-	-	-	☆☆	-
깍따구류	얇은 여울의 하상	-	-	-	☆☆	-
플랑크톤	전 하천	-	-	-	☆☆☆	-
부착조류	전 하천	-	-	-	☆☆	-

주) ☆ : 매우 미약, ☆☆ : 미약, ☆☆☆ : 보통, ☆☆☆☆ : 심함, ☆☆☆☆☆ : 매우 심함

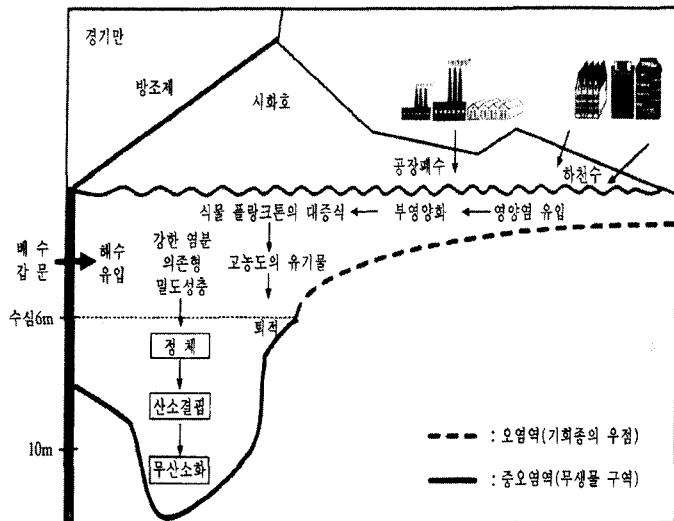


그림 22. 시화호의 부영양화와 오염경로 예측모식도(한국의 갯벌 p. 746, 2001)

료(환경부의 전국자연환경조사와 겨울철 조류동 시센서스 및 경기개발연구원의 경기도연안습지 생태계 기초조사)를 분석한 결과, 시화호 일대에는 총 25분류군의 법적보호조류가 도래하거나 서식하는 것으로 나타났다.

3) 문현자료 법적보호종은 대부분 맹금류이며, 수조류와 오리류는 알라해오라기, 큰기러기, 가창오리, 큰고니, 재두루미, 흑두루미 및 검은머리갈매기 등 9분류군으로 분석되었으며, 이들 법적보호조류는 시화호 최동단의 수변구역을 주요 서식지 및 도래지로 이용하고 있는 바, 사업시행 시 미치는 영향은 거의 없을 것으로 예측되었고, 또한, 조류의 생태특성상 생육입지환경이 물리적 교란작용이 수반되면 주변의 대체서식지로 이동하거나 시간의 축에 따라 안정화되면서 다시 찾아들 것으로 예상된다.

5. 결 론

연간 에너지 사용의 80% 이상을 수입에 의존하고

있는 우리나라의 경우, 대체에너지 개발을 통한 에너지 수입 의존도의 감소화 노력이 절실히 요구된다. 이와 함께 최근 점차 그 중요성이 인식되기 시작한 에너지 활동의 환경측면, 그 중에서도 발전 부문 환경문제가 점차 심각해지므로 조력자원의 개발은 일부나마 기존 화력발전을 대체할 수 있는 무공해 대체 에너지원으로 개발 가치가 크다 할 수 있다.

시화방조제는 대단위 간척종합개발 사업의 일환으로 1994년 2월에 완공되었으나, 방조제 공사가 완료된 후 시화만으로의 해수유통이 차단되고 인근 지역으로부터 유입된 오염물질의 축적으로 인해 호의 오염이 증가하여 시화호의

수질개선을 위한 종합적인 대책이 요구되어 왔다. 시화호 조력발전 건설사업은 시화호 수질개선 종합대책의 일환으로 시화호의 운영방법을 담수호에서 해수호로 전환함에 따라 해수호의 조절능력을 유지하고 또한 조석간만의 차를 이용한 해수순환을 통하여 해수정체로 인한 수질악화를 방지하는 한편 해양에너지 개발의 일환으로 추진되고 있다. 본 논문에서는 현재 진행 중인 시화호 조력발전소 건설에 따른 환경영향 평가의 개요를 소개하였다.

해수유동 수치모형은 현재의 상태를 잘 재현하는 것으로 나타났으며, 수차와 수문 구조물 인접설치안에 대한 해수 유동 수치실험 결과 외해수위가 올라갈 때 시화호내로 조류가 유입, 발전되고 외해수위가 낮아짐에 따라 시화호내 해수가 외해로 방류되는 양상을 잘 재현하였다. 해수유동 수치실험 결과는 퇴적물 이동 수치모형실험과 오염물질 확산 수치모형실험의 기초자료로 활용되었다.

시화조력발전소 건설·가동에 따른 시화호 및 시화방조제 전면 해역에 발생할 가능성이 있는 퇴적환경 변화를 예측하기 위해 퇴적물 이동 수치모형실험을 수행하였다. 실험결과, 수차 구간을 중심으로 송도 LNG 인수기지까지의 방조제 전면 해역은 침식되거

나 또는 현재보다 퇴적율이 저하될 것으로 예상되었다. 시화호의 경우, 수차구간 인접부를 제외한 거의 대부분의 영역에서 15일 동안 1.5~2.5mm 정도의 퇴적이 발생하였다.

오염물질 확산특성 분석을 위해서는 입자추적 물질 이동 확산수치모형을 이용하였으며, 15일간 발전소 가동후 시화호 내부의 전체 수질변화 및 발전소 가동에 따른 해수교환으로 인해 시화호내 잔여 오염물 총량을 평가하기 위한 실험을 실시하였다. 수차-수문 인접안과 수차-수문 분리 설치안에 대한 수치실험 결과 방조제 인근의 오염입자의 농도가 두 안 모두 전반적으로 크게 감소하는 결과를 보였으며, 잔여 오염물 총량은 수문-수차 인접안이 26.0%, 분리안이 25.5%로서 분리안이 약간 낮으나, 두안의 차이는 매우 작았다. 공간적 분포 특성에서 인접안은 시화호 내부 깊숙

이 영향을 주고 있고 상대적으로 방조제 근처에서의 농도는 분리안보다 높으며, 분리안은 수문을 통해 방출된 오염물질은 창조시 수문에 다시 유입되지 않으므로 수문 인근에서 농도감소가 뚜렷하게 나타나는 특성을 보인다. 결과적으로 조력발전소가 가동될 경우, 수개월 이내에 만 내의 수질은 외해수와 비슷하게 개선될 것으로 판단되며, 15일만에 만내의 오염부하량의 약 75%가 외해역으로 방출되는 것으로 판단할 때, 외해 환경에 미치는 영향을 보다 상세히 검토해야 할 것으로 판단된다.

시화호 조력발전소가 인근 수변지역 및 시화호내외 수역의 생태계에 미치는 영향은 공사기간 중의 소음과 토사유출로 인한 영향을 제외하면 매우 미미할 것으로 평가되었다.

참/고/문/헌

- Kang, S.K., Lee, S.-R., and H.J. Lie. 1998. Fine grid tidal modeling of the Yellow and East China Seas. Contin. Shelf Res. 18: 739~772.
- Kang, S.K., Chung, J.-Y., Lee, S.-R. and K.D. Yum. 1995. Seasonal variability in the tide in the seas adkacent to Korea. Contin. Shelf Res. 15(9): 1087~1113.
- '99전국자연환경조사 용인 화성의 자연환경. 2000. 환경부
- '01겨울철 조류동시센서스 - "시화호일대". 2001. 환경부
- '00겨울철 조류동시센서스 - "시화호일대". 2000. 환경부
- '99경기도 연안습지생태계 기초조사 - "시화호일대". 2000. 경기개발연구원
- '99겨울철 조류동시센서스 - "시화호일대". 1999. 환경부, vi: 신갈~안산고속도로화 포장사업 경영평가서. 1996. 한국도로공사
- '00전국자연환경조사 대부도(방아머리, 말부홍, 탄도) 해안의 저서무척추동물. 2001. 환경부
- Albaster and Lloyed 1991