

남 동위원소 연대측정을 이용한 시화호 내측 우음도의 퇴적환경 복원*

임영신** · 최한우*** · 양동윤**** · 김진관*****

Sedimentary Environmental Change of the Ueum Island in the Lake Shihwa Using Lead-210 Dating*

Young Shin Lim** · Hanwoo Choi*** · Dongyoon Yang**** · Jin Kwan Kim*****

요약 : 시화호는 방조제 완공 이후 시화호 내부의 섬들이 육지와 연결되는 변화가 발생하였다. 본 연구는 시화호 내부의 우음도 남쪽 갯벌에서 획득한 코어 샘플에 기록된 퇴적 환경의 변화를 분석하였다. 이를 위해 시화호 유역의 시기별 토지이용도 및 항공사진을 분석하였고, 남 동위원소 연대 측정법을 사용하여 코어 샘플의 퇴적 시기를 결정하고 퇴적 속도의 변화를 분석하였다. 퇴적 속도 변화에서 두 개의 큰 피크가 확인되었다. 첫 번째 피크는 방조제 건설이 완료되어 해양으로의 퇴적물 유출이 제한된 저에너지 환경에서 발생하였다. 두 번째는 갯벌 매립이 진행됨에 따라 샘플링 지점에 저수지 환경이 조성되었을 때 발생한 것으로, 조수로 상류에 위치한 인근 도로 건설 현장에서 유입된 퇴적물의 증가 시기와도 일치했다. 이는 시화방조제의 축조보다 시료 채취 지점 부근의 퇴적물 유입 및 유출 조건의 변화가 주조수로에서 멀리 떨어진 갯벌 내부의 퇴적물에 더 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다.
주요어 : 퇴적률, 남 동위원소 연대측정, 퇴적환경 변화, 우음도, 시화호, 인간간섭

Abstract : After the completion of the embankment, changes occurred in Lake Sihwa that connected the islands to the mainland. In this study, we tried to analyze the changes in the sedimentary environment recorded in the core samples obtained from the tidal flats south of Ueum Island inside Sihwa Lake. For this purpose, land use and aerial photographs were analyzed by time period in the Sihwa Lake basin, and the sedimentation age of the core samples was determined using the lead-210 dating method, and the change in sedimentation rate was analyzed. As a result of the sedimentation rate change, two large peaks appeared. The first represents a low-energy environment that occurred when seawall construction was completed and restricted sediment runoff to the sea. The second occurred when the reclamation of Ueum Island tidal flats increased and the tidal flats were blocked and a reservoir environment was created at the sampling site. These results indicate that changes in sediment input and outflow conditions near the sampling site had a bigger impact on sedimentation rates in the interior of the tidal flat, located far from the main tidal channel, than the construction of the Shihwa seawall.

Key Words : Sedimentation rate, Lead-210 dating, Sedimentary environmental change, Ueum Island, Lake Shihwa, Human interference

*이 논문은 2022년 대한민국 교육부 한국연구재단(NRF-2022S1A5B5A16052458)과 한국지질자원연구원(2018-0241)의 지원을 받아 수행된 연구임.

**전남대학교 지역지리정보연구센터 연구원(Researcher, Regional Geographic Information Research Center, Chonnam National University, teen0212@naver.com)

***한국지질자원연구원 제4기환경연구센터 책임연구원(Principal Researcher, Quaternary Environment Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, starlove@kigam.re.kr)

****한국지질자원연구원 제4기환경연구센터 책임연구원(Principal Researcher, Quaternary Environment Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, ydy@kigam.re.kr)

*****전남대학교 지리교육과 부교수(Associate Professor, Department of Geography Education, Chonnam National University, jinkwankim77@gmail.com)

I. 서론

서해로 유입되는 하천의 하류는 대체로 경사가 완만하며 대조차 환경의 영향을 받기 때문에 퇴적이 우세하게 나타난다. 금강, 만경강, 동진강, 영산강 뿐만 아니라 중국의 황하와 양쯔강 등 여러 하천들이 다량의 육상기원 퇴적물을 바다로 운반하고, 수심이 얕고 경사가 완만하여 조류가 넓은 범위에 걸쳐 영향을 미칠 수 있다. 이러한 환경에서 하천이 운반해온 퇴적물은 만입지와 같은 파랑에너지가 낮은 곳에 퇴적되어, 서해안에는 경기만, 남양만, 아산만, 천수만, 줄포만, 함평만 등에 큰 규모의 간석지가 발달해 있다.

간석지 지형은 비교적 지면 고도가 높고 평탄한 면과 그 사이 세곡(creek)과 같은 형태로 발달한 갯골(tidal channel)로 이루어져 있다. 갯골은 밀물과 썰물 시에 조수가 드나들며, 간석지 물질과 에너지의 주요 이동 통로이다. 밀물 시에는 갯골을 통해 조류가 해안을 향해 밀려와 평탄한 면을 가로질러 퍼져 나가며, 반대로 썰물 때는 평탄한 면에서 갯골 쪽으로의 배수가 일어난다. 조류의 유속 조건이 조위 및 간석지 지형에 따라 다르기 때문에, 자연 상태의 조건대 환경에서는 대체로 조류가 빠른 갯골 주변에 사질 퇴적물이 우세하게 분포하고, 만조선 쪽으로 가면서 퇴적물의 세립화 경향이 나타난다 (Lee *et al.*, 1985; 박용안 등, 2000).

간석지는 홍수를 조절하고 태풍, 해일 피해를 완화하는 완충작용을 하며, 전 세계적으로 생산성이 가장 높은 생태계를 지니고 있다. 그러나 토지가 부족한 우리나라에서는 오래전부터 비교적 지면고도가 높은 간석지를 개간하여 농경지로 이용해왔으며, 1980년대 이후로는 대규모 간척사업이 추진되어 많은 간석지가 사라졌다 (조명희·조화룡, 1997). 국내의 간석지에 행해진 가장 큰 규모의 인위적 간척은 용지확보를 위해 시화 방조제, 새만금 방조제를 건설하면서 방조제 내측이 호수화 된 것이다. 서해안의 만입지를 중심으로 대규모의 간석지가 형성될 수 있었던 이유는, 넓은 만의 입구를 지나 폭이 급격하게 좁아지는 강의 하구 쪽으로 조류가 밀려들면서 조차가 커지기 때문이다. 그런데 방조제 건설로 인해 이러한 지형 조건이 달라지면, 물질을 운반시키고 퇴적하는 조류의 방향과 유속, 조위 및 주변 해류 조건에 큰 변화가 생기게 된다(Lee *et al.*, 1999; Park *et al.*, 2014). 동시에 강 하구도 가로막힌 셈이 되어 간석지에

물질을 공급하는 우수 및 퇴적물 수지에도 변화가 발생하게 된다. 하천은 달라진 침식기준면, 즉 방조제 내측 수위에 맞추어 물질의 침식, 운반, 퇴적을 조절하게 되며, 이는 하구 및 연안에서의 퇴적량 및 간석지 지형에 예측하기 힘든 큰 변화를 야기한다(이희준 등, 2006; Lee and Ryu, 2008). 이외에도 하구역과 만입지를 가로막는 인공구조물의 건설은 수질과 저질(底質) 오염, 산업구조의 변화, 생태계 교란에 직·간접적 영향을 미친다(류종성 등, 1997; 이현영·이승호, 1997; Hong *et al.*, 2010; Ryu *et al.*, 2014).

특히 1994년 완공된 12.7km 길이의 시화 방조제는 이후 여러 환경 문제를 야기하였다. 당초에는 간척지에 조성된 농경지와 농업단지에 용수를 공급하기 위해 담수화를 시도하였으나, 저층에 잔류한 해수층과 지류로부터 유입된 표층의 담수가 밀도성층을 이루면서 혼합되지 않고 수온 상승, 저층의 무(빈)산소 현상, 수질 악화, 퇴적물 내 중금속 검출 등의 문제가 나타났다(해양수산부, 2001). 이에 따라 정부는 2000년 시화호의 담수화를 포기하고 갑문 조작을 통한 해수유통을 결정하였으며, 시화호 및 인천 연안을 특별관리해역 시범해역으로 지정하였다.

정부는 2001년 「시화호 종합관리계획」을 수립하였고 수질 및 저질 환경관리, 생태계 및 생물자원 관리, 연안 이용 및 공간관리, 관리체계 및 역량강화 4개 분야에 걸친 다양한 사업들이 1~4단계별로 시행되었다. 그럼에도 불구하고 시화호 유역에는 여전히 수질과 저질 오염 문제, 간척지에 건설된 국가 산업단지에 의한 오염, 남측 간석지에 조성되고 있는 농지와 그에 따른 탄도호의 수질오염, 시화호 내에 설치되어 있는 송전탑으로 인한 경관 훼손 및 생태계 교란 문제, 간척지 개발에 따른 생태계 파괴와 같은 문제들이 남아 있다(국토해양부, 2011). 해수유통 이후, 시화호 내측의 수위를 -1El.m로 관리하면서 육지화된 우음도, 형도, 어도의 환경변화에 대한 관심은 전무한 상황이다. 현재까지도 시화호 남측의 간석지를 대상으로 송산그린시티 개발사업이 진행 중이며, 지속가능한 연안 환경관리의 관점에서 이러한 대규모의 인간간척이 이 일대의 퇴적환경에 어떠한 영향을 미쳤는지 이해할 필요가 있다.

해양수산부 위탁으로 한국해양과학기술원에서 시화호 표층퇴적물의 지화학적 특성 및 중금속 농도 조사와 분석이 시행되었으며, 시화호의 심각했던 수질 문제와

관련해서 수질 및 퇴적물의 중금속 오염 연구가 많이 수행되었다(최만식 등, 1999; 최정훈 등, 2000; 김경태 등, 2003; 박준건 등, 2003). 보다 긴 기록을 담고 있는 시화호 코어 샘플에 대하여 지화학적 특성과 중금속 오염 분석을 시행한 Ra *et al.*(2011), 이준호 등(2011)의 연구에서는 퇴적물 산정을 위해 남 동위원소 연대측정(^{210}Pb geochronology)을 사용하였다. Ra *et al.*(2011)의 연구에서는 시화호 내의 해변부에서 방조제에 가까운 지점에서 서부터 만 안쪽까지 잠수부들이 총 4공의 코어 샘플을 채취하였다. 퇴적물은 방조제 가까이에 위치하며 수심이 약 16m로 매우 깊은 지점에서 가장 높게 나타났고 (1.47cm/year), 호수의 중앙부에서는 낮은 값이(각각 0.38, 0.62cm/year), 신길천 하구에 가까운 만의 안쪽 지점에서는 비교적 높은 값(1.15cm/year)이 나타났다. 유역 내에서 발생한 토사는 유출구에 가까운 쪽에 퇴적되기 때문에 신길천 하구에 가까운 지점에서 높은 퇴적물이 나타난 것으로 해석한 바 있다. 그러나 이들의 연구는 지화학적 특성 분석에 초점이 맞추어져 있었기 때문에, 퇴적물과 관련된 깊이 있는 논의는 이루어지지 않았다. 한편, 음향측심기를 이용하여 1996년과 2005년에 시화호 내측 방조제 주변의 해저지형 조사가 이루어졌고, 이 기간 동안의 연간 퇴적률은 3.8cm로 추정되었다(국토해양부, 2009). 그러나 시화호 내에서 호저면의 불규칙적인 지형분포가 나타나고(해양수산부, 2005) 수리학적 조건도 지점별로 다르기 때문에, 물질이동양상 및 침식과 퇴적의 경향을 시화호 전체에 대해 일반화하기는 어려운 상황이다. 따라서 퇴적물은 값 그 자체로 이해하기보다는 일대의 환경변화와 더불어 분석될 때 보다 의미가 있다고 할 수 있다.

점토, 실트와 같은 세립물질이 주를 이루는 간석지를 대상으로 퇴적환경변화를 추정하기 위해 근래에는 100~150년 내외의 연대를 추정할 수 있는 남 동위원소를 이용한 연대측정 방법이 시도되었다. 우한준 등(2006)은 새만금 방조제 내측 간석지를 대상으로 하여 해안선과 간조선 부근에서 코어 샘플을 채취하였고, $^{210}\text{Pb}_{ex}$ 의 값에 급격한 차이가 나타나는 70cm 깊이를 기준으로 퇴적률을 추정하였다. 또한 우한준 등(2012)은 강화 남부 간석지의 동쪽에 위치한 동검도 간석지 표층퇴적물을 채취하여 입도분석을 수행하였고, 코어 샘플을 채취하여 남 동위원소를 분석하여 퇴적속도를 산출하였다. 오해종 등(2006)은 시화호 내에서 채취한 코어 샘플에 대하

여 ^{210}Pb , ^{137}Cs 분석을 포함한 다양한 퇴적물 분석을 통하여 퇴적환경 변화에 대해 추정하였으며, 방조제 공사 기간과 완공 이후의 퇴적속도에 차이가 있음을 밝힌 바 있다.

그러나 시화호의 퇴적물을 분석한 선행연구들은 조력 발전소 주변 및 시화호 중앙부의 주조수로(main tidal channel)를 조사 대상으로 하고 있으며, 시화호 남측 간석지의 갯골 주변은 다루지 않았다. 우음도를 포함한 남측 간석지의 일부는 공룡알 화석지와 철새 도래지 등으로 보존될 예정이나, 주변이 주거지구, 관광레저 시설 등으로 개발되고 있어 인간간섭에 의한 퇴적환경 변화에 대한 이해가 반드시 필요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시화호 내측에 위치한 우음도 간석지를 대상으로 하여, 항공사진 분석을 통해 환경변화를 분석하고, 시기별 인간간섭 요인 및 퇴적환경을 복원하고자 하였다. 이를 위해 우음도 남단에 위치한 간석지에서 코어 샘플을 채취하고 남 동위원소 연대측정방법을 이용하여 퇴적물을 산출하였다. 나아가 샘플 채취 지점 주변의 환경변화를 고려하여 시기별 퇴적환경 및 영향 인자를 고찰하였다. 코어 샘플에 기록된 인간간섭의 영향에 대한 토의 결과는 지속가능한 간석지 관리에 대한 대책수립에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

II. 연구 지역 및 연구 방법

1. 연구 지역

시화호는 행정구역상 경기도 안산시, 시흥시, 화성시에 둘러싸여 있으며, 방조제 건설 이전에는 경기만 안쪽에 위치한 군자만이라고 불리는 내만의 형태를 가진 기수역 환경이었다. 수도권의 인구 및 산업체 분산을 목적으로 추진된 『안산·시화지구 개발사업』의 일환으로 인공호수인 시화호가 조성되었다. 시흥시 오이도와 대부도 방아머리를 잇는 시화방조제 건설사업은 1987년 4월에 착수하여, 1994년 1월 12.7km의 방조제 최종 물막이 공사를 완공하였다. 2008년 기준 시화호의 관리 수위인 -1El.m에서 총 저수용량은 303.4백만 m^3 , 호수면적은 90.0 km^2 , 평균수심은 3.3m, 유역면적은 405.7 km^2 이다.

그림 1(a)에는 시화호 유역을 구성하는 신길천, 화정천, 안산천, 반월천, 동화천, 남전천, 문산천을 중심으로

한 수계와 간석지의 분포를 나타내었다. 시화호로 유입하는 하천들의 유로연장은 15km 이내로 짧은 편이며, 유로연장에 비해 하폭이 넓은 특성을 가지고 있다. 시화호의 남쪽 지역은 특히 하천의 발달이 미약하며 섬들 사이로 넓은 간석지가 나타난다. 시화호 유역은 비교적 기복이 완만하며, 하구 및 간석지 일대는 극히 평탄한 지형으로 되어있다.

관리 수위인 -1El.m에서 시화호 북측에 11.87km², 남측에 97.09km²의 간석지가 드러난다. 유인도였던 형도, 우음도, 어도가 방조제 건설로 인해 육지화 되었으며, 조

성된 간석지는 농·산업단지, 주거단지, 생태 및 관광레저 시설로 개발되었거나 현재 개발 중이다. 1998년에 대부도와 면하고 있는 시화호의 남서부에 간척농지를 개발하는 농지개발계획이 확정되었다. 농업용수 공급을 위해 시화호 내에 방수제를 쌓았으며, 이에 따라 7.6km²의 탄도 담수호와 36.36km² 면적의 농업용지(대송단지)가 조성되었다. 시화호 북측의 간석지 일대에는 2020년 시화 멀티 테크노 밸리(MTV) 산업단지가 조성되었으며, 시화호의 남측 일대에는 현재 송산그린시티 조성사업이 시행되고 있어 호수 면적은 43.8km²로 크게 감소하였다.

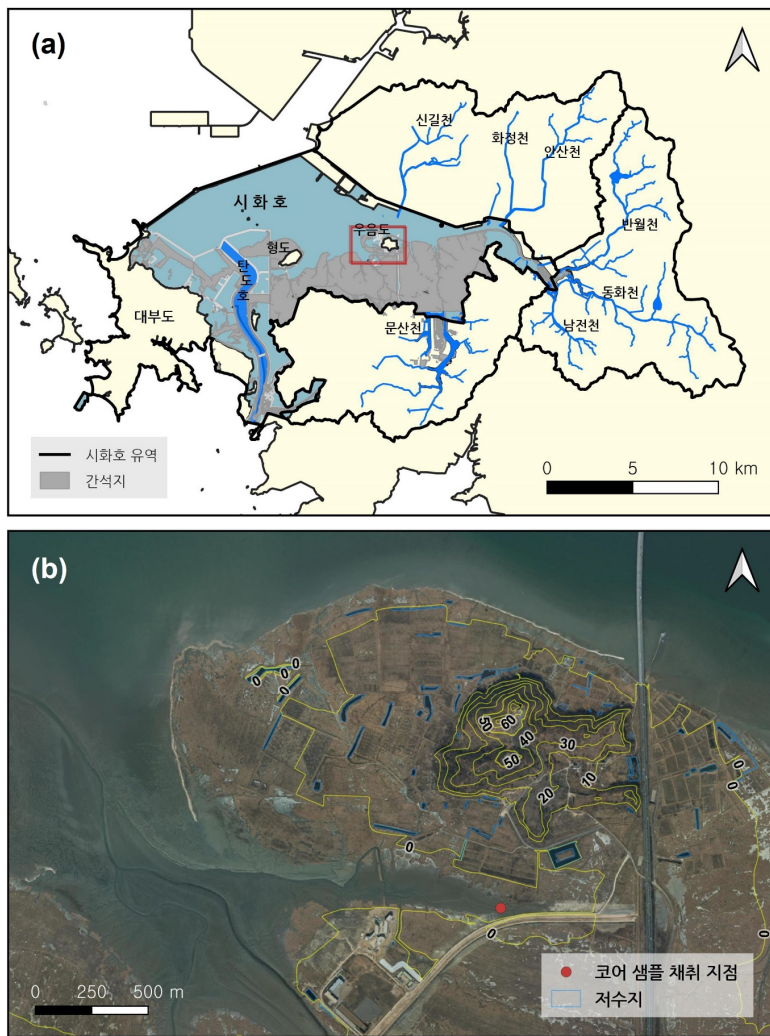


그림 1. 시화호 연구지역

(a) 연구유역의 수계 및 간석지 분포도, (b) 우음도 일대 지형 및 저수지, 코어 샘플 위치도

출처 : 국토지리정보원, vworld 항공사진

그림 1(a)는 국토지리정보원에서 제공하는 연속수치지형도의 2020년 수부지형경계 레이어(code: WPT002 and WPT004)를 이용하여 간석지의 분포를 나타냈기 때문에 매립이 완료된 복측의 간석지는 육지로 표현되었다.

그림 1(b)에는 vworld 항공사진을 배경지도로 이용하여 우음도 일대의 지형과 저수지 분포, 코어 샘플의 위치를 나타내었다. 화성시 송산면에 위치한 우음도(牛音島)는 시화호가 근자만이었던 당시에 바다 가운데에 있는 면적 0.42km²의 섬이었다. 섬 지형이 소의 모습과 닮아서 혹은 육지에서 소 울음소리가 들렸다 하여 우음도라는 이름이 붙었다고 전해진다(화성시·화성문화원, 2007). 과거에는 섬이었으나 방조제 건설로 육지화 되었고, 송산그린시티 개발로 인해 현재까지도 큰 환경변화를 겪고 있다. 섬에서 가장 높은 지점의 고도는 해발 66.6m이며, 현재는 송산그린시티 전망대가 세워져 있다.

2. 연구 방법

1) 시화호 코어 샘플 채취

시화호 퇴적물의 연대를 측정하고 퇴적물을 복원하기 위해 퇴적물 코어 샘플링을 수행하였다. 코어 샘플은 2018년 6월 28일 우음도 남단 시화호 내측의 갯골 주변에서 채취하였다(그림 1(b), 37° 16′ 46″ N, 126° 44′ 18″ E).

코어 샘플링은 퇴적물의 다짐 작용(compaction)을 최소화하기 위해 내경 40mm의 rod-operated Multisampler piston core sampler(Eijkkelkamp, Netherlands)를 이용하여 채취하였다. 채취한 갯골 퇴적층 상부 71cm의 퇴적물 코어를 실험실로 가져온 후 1cm 간격으로 시료를 분할하고, 자연 건조하였다. 그리고 60°C에서 48시간 건조한 후에 건조밀도를 측정하였다.

감마 분광 분석을 위해 천처리한 시료를 100cc 분석용기에 담고, ²²²Rn과 모핵종인 ²²⁶Ra가 방사평형에 도달 및 안정화될 수 있도록 최소 3주간 밀봉상태로 방치한 후에 측정을 시행하였다. ²¹⁰Pb 연대측정을 위해 한국지질자원연구원의 감마스펙트로미터(Model GR10026, Canberra, U.S.A)를 사용하여 80,000초 동안 분석하였다. 검출된 값은 ²¹⁰Pb(46.5keV), ²¹⁴Pb(295, 352keV) 및 ²¹⁴Bi(609keV)의 에너지 피크, 배경값 등을 보정하여 분석에 사용하였다. 조건대의 특성상 ¹³⁷Cs은 측정되지 않았다.

2) ²¹⁰Pb 측정 및 ²¹⁰Pb 연대측정 모델

²¹⁰Pb는 자연적으로 발생하는 방사성동위원소로, 우라늄계열의 연쇄적인 붕괴과정에서 라듐, 라돈 등의 붕괴를 거쳐 생성되는 물질이며 반감기는 22.26년이다. ²³⁸U의 붕괴는 α붕괴 8회, β붕괴 6회를 거쳐 안정 동위원소인 ²⁰⁶Pb에서 끝난다. 이 붕괴과정에서 생성된 방사성핵종 중에 ²²⁶Ra(반감기 1600년)은 암석과 토양에 존재하며, ²²⁶Ra이 붕괴하여 생기는 ²²²Rn(반감기 3.825일)은 불활성 기체이다. ²²²Rn이 붕괴하면서 ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²¹⁴Po 등의 딸핵종을 생성하며, 계속된 붕괴로 ²¹⁰Pb, ²¹⁰Bi, ²¹⁰Po 이 생성된다.

토양 또는 퇴적물에서 검출된 총 ²¹⁰Pb의 활동도(activity)는 “supported” ²¹⁰Pb와 “excess” 또는 “unsupported” ²¹⁰Pb 두 가지 요소로 구성된다. “supported” ²¹⁰Pb는 암석과 토양에 존재하는 ²²⁶Ra의 제자리 붕괴로 형성된다. 한편, 토양으로부터 대기로 방출된 중간생성물 ²²²Rn의 일부가 대기로 상승 및 확산되고, 강수에 의해 씻겨 내려와 표토에 흡착하거나 또는 건조 낙진에 의해 에어로솔 형태의 ²¹⁰Pb로 다시 지표면에 떨어진 것을 “excess” 또는 “unsupported” ²¹⁰Pb(이하 ²¹⁰Pb_{ex})라고 부른다. 연대 측정에 사용되는 ²¹⁰Pb_{ex}는 퇴적물에서 검출된 총 ²¹⁰Pb의 활동도에서 ²²⁶Ra 제자리 붕괴 기원의 “supported” ²¹⁰Pb의 활동도를 빼서 구할 수 있다.

$$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = \text{total } ^{210}\text{Pb} - \text{“supported” } ^{210}\text{Pb}$$

²²⁶Ra 제자리 붕괴 기원의 “supported” ²¹⁰Pb의 활동도는 간접적인 방식으로 구할 수 있다. “supported” ²¹⁰Pb는 모핵종인 ²²⁶Ra과 방사평형을 이루기 때문에 ²²⁶Ra 값을 “supported” ²¹⁰Pb의 프록시로 사용한다. 그러나 감마분광분석을 이용한 ²²⁶Ra(186.1keV)의 직접적인 측정값은 인접한 피크를 가지고 있는 ²³⁵U(185.74keV)의 감마선 방출 간섭으로 인해 복잡한 보정이 필요하다. 따라서 일정시간을 밀봉상태로 방치하여 방사평형을 이루게 한 뒤 분석이 용이한 ²¹⁴Pb(295, 352keV) 또는 ²¹⁴Bi(609keV) 등 딸핵종의 감마 방사능을 측정하여 그 값을 ²²⁶Ra의 지표값(indicator)으로 대체하여 사용한다. 본 연구에서는 효율성 보정이 간단한 ²¹⁴Bi의 광전피크(photopeak)인 609keV 측정값을 ²²⁶Ra의 지표값으로 이용하였다(Schelske *et al.*, 1994).

한편, ^{210}Pb 연대를 계산하기 위한 방법으로는 CIC (Constant Initial Concentration)와 CRS(Constant Rate of Supply) 두 가지 모델이 있다(Appleby and Oldfield, 1978; Appleby and Oldfield, 1983). CIC 모델은 퇴적물의 표층에 공급되는 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 농도가 일정하다고 가정한다. Pennington *et al.*(1976)은 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 가 호수에 일정하게 유입되고 이들의 체류시간이 일정하며 퇴적물 내에서의 현저한 이동이 없는 경우를 가정하였다. 가정에 따르면 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 농도는 일반적인 방사성동위원소 붕괴 법칙을 따르기 때문에 퇴적물의 깊이에 비례하여 지수적으로 단조롭게 감소할 것이다. CIC 모델은 표층에 대한 상대적인 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 활동도와 ^{210}Pb 의 반감기로부터 특정 깊이에서의 퇴적물 연대를 계산할 수 있다.

그러나 심도별 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 농도 분포가 지수적으로 일정하게 감소하지 않는다는 연구결과들이 다수 존재한다(Appleby and Oldfield, 1978; Ahn *et al.*, 2010). 특히 퇴적물의 급격한 변화를 경험한 경우, 가속화된 퇴적에 의해 퇴적물의 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 농도가 낮아질 가능성을 수용하면서 Appleby and Oldfield(1978)는 CRS(Constant Rate of Supply) 모델을 제안하였다. CRS 모델은 퇴적물에서 발생할 수 있는 변동과는 관계없이, 대기로부터 ^{210}Pb 의 낙진에 따른 퇴적물의 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 공급이 일정하다고 가정한다. 따라서 심도별 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 농도는 유역에서 공급되는 물질의 양이나 퇴적률에 따라서 달라진다. 최근에는 CRS 방법이 가장 흔히 사용되고 있으며, 본 연구에서는 ^{210}Pb 연대 및 퇴적률 계산을 위해 Appleby and Oldfield (1978)의 CRS 모델을 이용하였다. $t(\text{year})$ 시간이 경과한 후, 퇴적물 코어에서 깊이 x 하부의 총 잔여 unsupported ^{210}Pb 농도, $A(x)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$A(x) = A(0)e^{-kt}$$

$A(0)$ 은 퇴적물 코어 전체의 총 잔여 unsupported ^{210}Pb 농도이며, k 는 ^{210}Pb 의 붕괴상수(단위시간당 붕괴확률, $\ln 2/^{210}\text{Pb}$ 반감기)를 나타낸다. $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 은 시간의 흐름에 따라 붕괴하면서 방사능의 세기가 지수함수로 감소하며, 위 식을 퇴적물의 연대 t 에 대해서 정리하면 아래와 같다.

$$t = \frac{1}{k} \ln \frac{A(0)}{A(x)}$$

퇴적률 $r(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$ 은 아래의 식을 이용하여 구할 수 있다. C 는 깊이 x 에서의 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 의 농도를 나타낸다.

$$r = \frac{kA(x)}{C}$$

3) 시화호 및 우음도 일대의 토지이용 변화 분석

시화호 유역의 시기별 토지이용 변화를 분석하고자 환경부 환경공간정보서비스에서 제공하는 1980년대 말(1987~1989년 촬영한 Landsat TM 기반), 1990년대 말(1997~1999년 촬영한 Landsat TM 기반), 2000년대 말(2008~2010년 촬영한 Landsat 7 기반), 2010년대 말(2018~2019년 촬영한 Landsat 8 기반)의 토지피복도를 활용하였다. 30m급 해상도를 갖는 대분류 토지피복도 인천, 안양, 대부, 남양 도엽에서 시화호 유역을 추출하여 분석에 이용하였다. 토지 피복 상태는 시가화 지역, 농경지, 산림, 초지, 습지, 수역 6가지로 구분하였다.

또한 우음도 일대의 환경변화 분석을 위해 시기별 항공사진을 수집 및 활용하였다. 국토지리정보원과 화성시청에서 제공하는 1977년, 1985년, 2000년, 2006년, 2007년, 2011년, 2014년, 2017년의 항공사진을 지상기준점(GCP, ground control point)을 이용하여 기하보정한 후 환경변화 분석에 활용하였다.

III. 연구 결과 및 토의

1. 시화호 유역 및 우음도의 환경 변화

토지이용에 따른 지표면 상태는 토사 유출에 큰 영향을 미친다. 토지이용 특성에 따라 같은 강우사상이 발생하였더라도 퇴적물의 공급측면인 토양침식 및 토사유출이 달라질 수 있으므로, 시기별 토지이용의 변화 분석은 시화호의 퇴적률 해석에 있어 필수적이다.

1980년대 말 토지피복도에서는 만입지의 형태가 잘 나타난다. 방조제 건설 이전에도 상부조간대는 대부분 간척·개간되어 경작지화 되었으나, 반월천과 동화천 하류 연안을 중심으로 미개간된 간척지가 자연상태로 남아있는 것을 확인할 수 있다(그림 2(a)). 반월공업단지를 중심으로 시가화 지역이 나타나며, 농경지와 산림 면적이 이후 시기에 비해 비교적 넓게 나타난다. 신도시 개

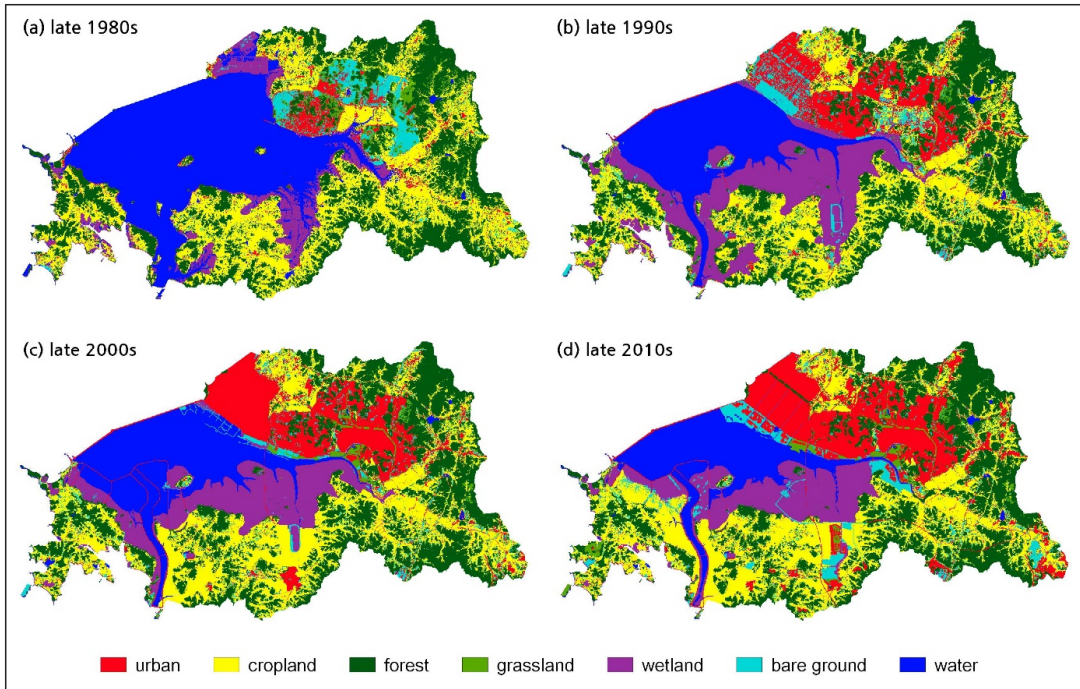


그림 2. 시화호 유역의 시기별 토지이용 변화
(a) 1980년대 말, (b) 1990년대 말, (c) 2000년대 말, (d) 2010년대 말

출처 : 환경부 환경공간정보서비스

발로 인해 공사가 진행 중인 지역들이 나지 상태로 나타난다. 1990년대 말 토지피복도에는 안산시를 중심으로 신도시 및 산업단지 등의 시가화 지역이 넓게 나타나는 한편, 화성시 동화천 유역 주변으로는 농경지의 비율이 높게 남아있다. 1980년대 말에 진행되었던 공사가 대부분 마무리되면서 감소한 나지 면적이 시가화 지역으로 대체되었다. 더불어 1994년 시화호 방조제 물막이 공사가 완공되고, 잇따르는 수질악화 문제로 인해 해수유통이 결정되면서 시화호 내측의 습지 면적이 크게 증가한 것을 알 수 있다(그림 2(b)). 이는 시화호 내측의 수위를 -1Et.m로 관리하면서 중·상부조간대에 해당했던 간석지들이 대기 중으로 상시 노출되었기 때문이다.

2000년대 말 토지피복도에는 오이도 동쪽 시화호 북측 간석지의 변화가 크게 나타났다(그림 2(c)). 2001년 시화호 종합관리계획이 확정되었고, 1단계 사업의 대상이 되었던 이 지역에 반월특수지역 시화지구를 비롯한 주거지 등이 들어서면서 시가화 면적이 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한 시화호가 해수호가 되면서, 간척농지에 농업용수를 공급하기 위해 2001년부터 탄도담수호

및 방수제를 조성하기 시작하였다. 2000년대 말 토지피복도에는 탄도호 주변의 이러한 변화가 반영되어 탄도방수제가 만들어진 것을 확인할 수 있다. 2010년 말의 토지피복도에서는 대송단지 간척농지 개발사업이 진행되어 형도 주변에 큰 변화가 나타난다(그림 2(d)). 일부 간척지를 포함하여 대송단지 내 인공습지가 조성된 것을 확인할 수 있다. 송산그린시티 동측지구(화성시 새솔동)와 자동차 테마파크 등이 조성될 예정인 남측지구(송산면 삼촌리 일대)가 개발되면서 간척지가 나지와 시가화 지역으로 대체된 것을 확인할 수 있다. 또한 시가화 지역이 하천의 상류부로도 확대된 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 시기별 우음도 일대의 시계열 항공사진이다. 우음도가 바다 가운데의 섬이었던 1977년 항공사진은 고조위에 가까운 시간, 1985년의 항공사진은 저조위에 가까운 시간에 촬영된 것으로 보인다. 1977년과 1985년의 항공사진에서는 해안을 따라 기반암 노출면과 사빈이 나타나고, 섬을 둘러싸고 있는 넓은 간척지가 드러나 있다(그림 3(a), (b)). 비교적 지면 고도가 높고 평탄한 면과 그 사이 세곡과 같은 형태로 발달한 갯골이 나타나

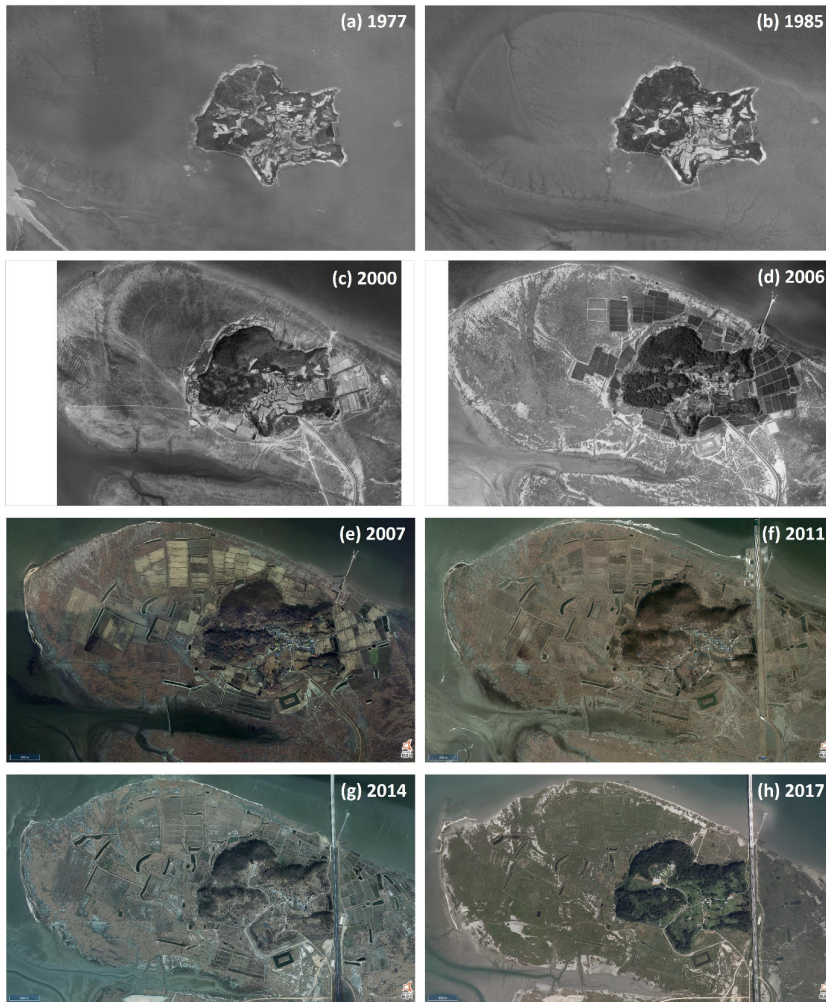


그림 3. 우음도 일대의 시기별 항공사진

(a) 1977년, (b) 1985년, (c) 2000년, (d) 2006년, (e) 2007년, (f) 2011년, (g) 2014년, (h) 2017년

출처 : (a)~(d) 국토지리정보원, (e)~(h) 화성시청

며, 조수가 드나드는 주수로는 우음도의 북서-남동 방향으로 놓여있다. 우음도를 둘러싼 간석지의 남쪽 경계를 이루는 갯골은 동서 방향이며, 수지상의 패턴을 보여준다. 방조제 건설 이전에는 우음도 주민들이 주로 어업에 종사하였고, 우음도의 남쪽에 배를 탈 수 있는 작은 항구가 있었다. 민가는 섬의 중앙부에 주로 분포하고, 평탄한 섬의 남동부를 중심으로 논농사와 밭농사가 이루어졌다.

2000년 항공사진에서는 방조제 건설 이후 수질악화에 따른 해수유통이 결정되고 시화호 내측의 수위를 -1E1.m로 관리하면서 우음도가 육지화된 것을 확인할 수 있다

(그림 3(c)). 섬의 남쪽에서 남동쪽으로 뻗어 있는 도로는 화성시 북단과 연결된다. 물으로 드러난 비교적 고도가 높은 간석지를 농경지로 간척하였으며, 특히 섬의 남서부와 동부를 중심으로 육역이 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한 간척지 곳곳에 논농사를 짓기 위해 조성해 놓은 저수지를 찾아볼 수 있다. 자연 상태에서 조수가 경사 방향을 따라 외해/내륙 양방향으로 드나들면서 수지상의 갯골 패턴이 나타났던 것과는 다르게, 지면고도가 높은 곳을 중심으로 바닷물이 점차 영향을 미치지 않게 되면서 섬 서쪽과 남쪽의 소규모 갯골이 대부분 사라졌다.

2006년 항공사진에서는 특히 섬의 서부와 북부에서

경작지가 북서쪽으로 확장되었다(그림 3(d)). 해수의 영향을 받지 않는 기간이 길어지면서 우음도 간석지에 염생습지가 형성된 모습을 볼 수 있다. 우음도 남쪽 간석지의 경우 동서 방향의 갯골 주수로에 수직으로 작은 갯골들이 배열되어 있으며, 이 작은 갯골을 따라 물질이 이동되고 퇴적되는 과정에서 헛바다 모양으로 튀어나온 지형이 발달하였다.

2007년에는 상부조건대를 중심으로 항공사진에서 붉은색으로 보이는 염생식물이 분포하는 것을 확인할 수 있다(그림 3(e)). 2006년과의 가장 큰 차이는 사방으로 경작지가 확대되었으며, 특히 논 면적이 크게 증가했다는 점이다. 특히 간석지가 넓게 펼쳐진 섬의 서부에서 간척 및 경지정리가 끝났거나 진행 중인 넓은 논이 있고, 농업용수 확보를 위해 곳곳에 저수지를 파 놓은 모습을 볼 수 있다. ‘뚝병(웅덩이)’이라고도 불리는 저수지는 간척이 진행된 방향으로 논과 나란하게 늘어서 있으며, 저수지 규모가 크지는 않지만 길쭉한 모양으로 산재해 있어 독특한 경관을 나타낸다. 그리고 우음도 남쪽 갯골 주수로를 가로막는 방향으로 제방이 만들어진 것을 확인할 수 있다. 이 제방은 논농사를 지을 수 있는 부지가 획기적으로 늘어나면서, 우음도 주민들이 섬 안에서 논농사를 짓기 위해 필요한 용수 공급을 위해 쌓은 것이다. 해수를 막고 민물을 받아 놓는 용도로 2011년까지 제방 역할을 수행했다.

2011년 항공사진에서는 제방 상류로 민물을 담수하여 호수와 같은 모습이 나타나며, 섬 곳곳에 산재한 저수지(뚝병)에도 물이 차 있는 모습을 볼 수 있다(그림 3(f)). 그리고 우음도를 남북으로 가로지르는 도로 공사가 진행되는 모습을 확인할 수 있는데, 이는 2008년 3월 착공한 평택-시흥 고속도로이다. 우음도를 지나 시화호를 건너가는 교량을 건설하는 과정에서 물막이 공사가 동반되었으며, 2013년 3월 개통하였다.

2014년 항공사진에는 매립농지에 규칙적인 패턴을 가지고 있는 원형의 웅덩이가 확인되는데, 수자원공사 측에서 섬 주민들이 허가 없이 논농사를 짓는 것을 막기 위해 파 놓은 구덩이이다(그림 3(g)). 2007년에 시화지구 지속가능발전협의회를 통해 송산그린시티 개발계획 추진 기본방향에 대한 기본적인 합의가 이루어졌고, 2010년 환경영향평가가 완료되었다. 송산그린시티 조성 사업이 본격적으로 진행되면서, 수자원공사는 2011년에 시화호 개발로 사라진 철새 서식지를 대신해 우음도 간석지에 194만²m 규모의 철새 서식지를 조성하는 업체선

정을 마쳤다(대한경제, 2011-05-26). 2012년부터 우음도에서의 논농사가 금지되면서 보에 물을 가두어 둘 필요가 없어졌고, 따라서 제방의 복쪽 갯골로 조수가 우회하여 드나드는 것을 확인할 수 있다. 우음도 남단의 갯골 건너편에 위치한 간석지에 건설되고 있는 것은 수자원공사의 송산 글로벌 교육 연구 센터와 송산그린시티의 하수를 처리하기 위한 새미하수처리장이다.

2017년 항공사진에서는 우음도 간석지 대부분에 염생식물이 자리잡고 있는 것을 확인할 수 있다(그림 3(h)). 섬 안에 있던 건물들이 대부분 철거되었고, 대부분의 땅이 녹지로 달라졌다. 이 시기에 수자원공사는 우음도 둘레길(총 연장 1.65km)을 조성하였고, 갯벌체험장을 비롯한 시화호 환경학교를 조성하였다.

2. 시화호 퇴적물 코어 분석 결과

²¹⁰Pb_{ex} 농도는 대체로 코어 상부에서 높게 나타났으나, 뚜렷한 지수함수적인 감소 경향은 나타나지 않았다. 따라서 갯벌에서 채취한 71cm 깊이의 퇴적물 코어에 대해 CRS 방법을 적용하여 퇴적연대를 계산하였고, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 시료 채취일인 2018년 6월을 기준으로 하였을 때, 심도 71cm의 퇴적연대는 148년 전에 해당하는 약 1870년 경으로 추산된다.

남 동위원소 연대측정을 통해 얻은 퇴적연대를 토대로 퇴적률을 계산하였다(그림 5). 간석지에 대한 인위적인 간섭이 없었던 1970년 이전에는 0.31g/cm²의 평균값

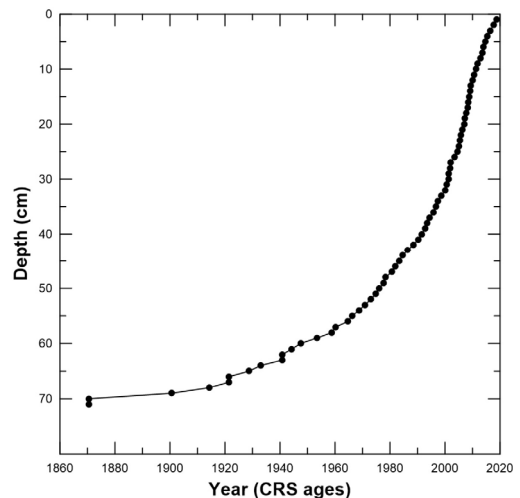


그림 4. CRS 모델을 적용한 시화호 퇴적물 코어의 연대

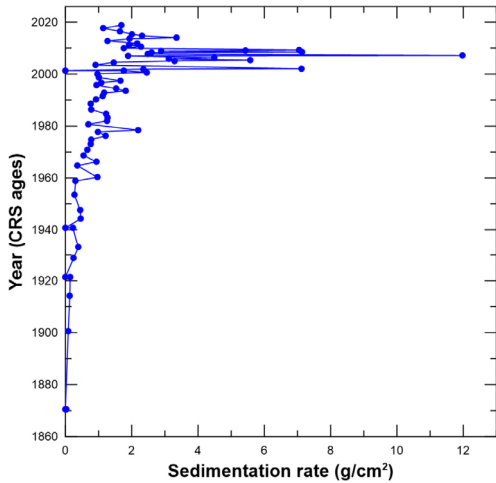


그림 5. 시화호 코어 퇴적물의 연대와 퇴적률

을 가지며, 비교적 퇴적률이 낮게 나타났다. 1970년대부터는 서서히 퇴적률이 증가하는 양상이 나타나며, 1970년부터 1994년 이전까지는 $1.10\text{g}/\text{cm}^2$ 평균 퇴적률을 갖는 것으로 나타났다. 이 시기 동안 1977년 여름 시기를 포함하는 깊이에서 $2.20\text{g}/\text{cm}^2$ 의 비교적 높은 퇴적률 값이 나타났다. 한편, 시화호 방조제가 완공된 1994년부터 코어 최상부까지의 퇴적률은 평균 $2.83\text{g}/\text{cm}^2$ 의 값을 가진다. 특히 2005년에서 2009년 동안에는 큰 퇴적률 값이 여러 차례 기록되었으며, 평균 퇴적률은 $4.59\text{g}/\text{cm}^2$ 로 계산되었다. 2010년 이후로는 평균 $1.97\text{g}/\text{cm}^2$ 정도의 퇴적률을 나타낸다.

3. 납 동위원소 연대측정을 이용한 우음도 일대의 퇴적환경 복원

시화호 유역의 토지 이용은 1977년 안산신도시 개발을 시작으로 반월 공단 및 반월신도시 건설 주거지 조성 공사가 이루어져 1980년대 말 토지피복도에는 나지 면적이 넓게 나타났다(그림 2(a)). 교외지역 개발과 관련된 건설공사 기간 중에는 토양이 심하게 교란되고 나지로 드러난 상태에서 일시적으로 하천으로 공급되는 토사유출량이 증가한다. 그러나 도시가 들어서면서 시멘트 혹은 아스팔트로 피복된 시가지 면적이 증가하기 때문에 침투유량은 증가하고, 유역에서 공급되는 퇴적물의 양은 감소하였을 것으로 추정된다(Marsh and Grossa Jr, 1996). 도시개발이 하도를 직접적으로 변형시킬 수 있고

또한 유출방식의 변화를 야기하기 때문에, 증가한 침투 유량에 의해 하도 내 침식이 증가할 가능성이 존재한다. 그러나 방조제 건설 이전에는 우음도가 바다 가운데에 있는 섬이었고, 코어 샘플 지점이 화정천, 안산천, 반월천, 동화천, 남전천의 유출구로부터는 상당히 떨어져 있었기 때문에 유역에서 공급되는 퇴적물의 양에는 큰 영향을 받지 않았을 것으로 추정해 볼 수 있다. 우음도 남단의 갯골 주변에 위치한 코어 샘플 채취 지점은 시화방조제 건설 이전에는 조간대 환경이었으며, 조차가 큰 경기만의 안쪽에 위치하고 있어 조류에 의한 물질의 이동과 퇴적이 지배적인 영향을 미쳤을 것이다.

1983년~84년에 걸쳐 별망(現 안산 단원구 초지동) 내측의 조간대를 대상으로 조류에 의한 퇴적물의 이동과 퇴적 양상을 조사했던 Lee *et al.*(1985)에 따르면, 반월지역 간석지의 퇴적은 주로 조석에 의해 통제된다. 표층 퇴적물의 입도는 갯골 주변으로는 사질 실트가 분포하며 만조선 쪽으로 갈수록 실트, 점토 순으로 세립화되는 경향이 나타났다. 또한 밀물과 썰물의 유속은 조차가 클수록 더 빠르기 때문에, 사리(대조)와 조금(소조) 시기에 조류의 세기(유속)에 큰 차이가 있고 이것이 부유토사 농도의 차이를 야기한다고 밝혔다. 즉, 조위가 부유 퇴적물의 이동에 큰 영향을 미쳤으며, 이 지역에서의 퇴적은 주로 사리 동안에 발생한다고 밝힌 바 있다. 시화호 북측(안산)과 남측(남양) 상부조간대에서 심부시추 및 퇴적물의 물리화학적 분석을 통해 제4기 후기 층서를 설정한 박용안 등(2000)의 연구결과에서도 시화방조제 건설 이전에는 이러한 반일주기 조석에 의한 퇴적작용이 반복되면서 자연상태의 현세 조간대 퇴적층을 형성하였을 것으로 해석하였다.

따라서 1987년 방조제 착공 이전에 해당하는 코어 샘플 하부 43cm 이하의 퇴적물은 자연상태의 조간대 환경에서의 퇴적환경을 반영하고 있다고 볼 수 있다. 1987년 이전의 퇴적속도는 $0.003\sim 3.11\text{g}/\text{cm}^2/\text{year}$ 이며, 평균 퇴적속도는 $0.46\text{g}/\text{cm}^2/\text{year}$ 로 추산되었다. 최근 50년에 대한 코어 샘플의 퇴적속도를 나타내는 그림 6에서 1977년 여름과 1978년 봄 사이에 비교적 큰 값($3.11\text{g}/\text{cm}^2/\text{year}$)이 나타난다. 이는 '안양천 대홍수'로 알려진 1977년 7월 8일 ~ 9일 경기 지역의 집중호우를 반영하고 있다고 볼 수 있다. 1977년 7월 8일 6시부터 24시간 동안 454.5mm의 강수(1000년 빈도)가 안양지역에 집중되었고, 특히 8일 20시부터 1시간 동안 99.5mm의 집중호우가 기록되

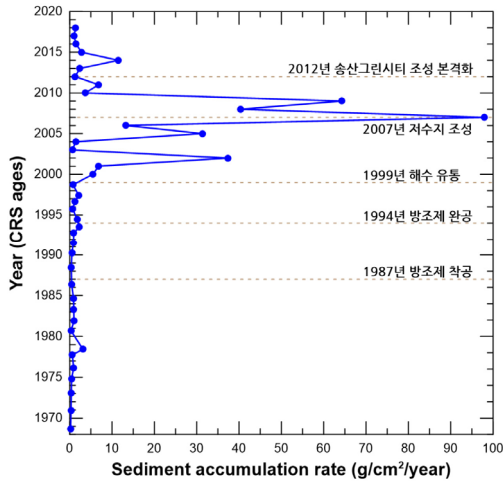


그림 6. 최근 50년에 대한 시화호 코어샘플의 퇴적속도

었다(안양천 생태이야기관). 시흥에서도 400mm의 강수량을 기록했으며, 안양천이 범람하고 시흥에서 산사태가 발생하여 막대한 인명·재산 피해가 발생하였다. 안산과 화성은 각각 1992년과 1993년에 기상관측을 시작하여 당시의 기록이 남아있지 않지만, 시흥의 강수기록을 참고하면 당시에 시화호 유역과 우음도 내에서도 극히 많은 양의 토사가 발생했을 것으로 추정할 수 있다. 유실된 토양은 집중호우 직후에는 유출구 주변에 주로 퇴적되었을 것이지만, 조류에 의한 물질의 재동(remobilization)을 통해 코어 샘플 지점에도 상당한 양이 퇴적되었을 것이다.

이후 시화 방조제가 완공되어 외해와 해수유통이 단절되면서 1994년~1999년에는 호수(담수호) 환경이 조성되었다. 1987년부터 1993년까지 공사 기간 동안의 평균 퇴적속도는 1.00g/cm²/year이었으며, 방조제 완공 이후 1994년부터 1998년까지의 평균 퇴적속도는 1.32g/cm²/year로 계산되었다. 물막이 공사를 동반하는 공사 기간을 비롯하여, 방조제 완공 이후 조류의 영향을 받지 않게 된 호수 내측에서 퇴적속도가 급격히 증가한 것으로 판단된다. 조위가 비슷한 시화 방조제 건설 전후 영향을 비교 분석한 양소연 등(1999)의 연구결과가 이를 뒷받침한다. 시화방조제 건설 이후의 영상(1994년 9월, 1996년 1월)에서 방조제 안쪽의 해안선을 따라 퇴적물이 집적되었음을 확인하였다. 새만금 4호 방조제 완공 이후 방조제 내측 간석지의 지형변화를 모니터링하고 이전시기와의 차이를 분석한 우한준 등(2006)의 연구에서도 방조제

건설 이후 조류의 방향 및 유속 변화에 따라 퇴적현상이 우세하게 나타났음을 밝힌 바 있다. 또한, 이준호 등(2011)에 따르면, 형도 북동쪽과 송산면 독지리 방향 남동쪽에서 각각 채취한 70~90cm의 코어 퇴적물에서는 약 30~35cm 깊이를 기준으로 ²¹⁰Pb_{ex} 농도에 급격한 차이가 나타났다. 이들은 약 35cm 하부층은 방조제 건설 이전의 퇴적층으로, 35cm 상부층은 방조제 건설 및 형도 주변의 방수벽 건설로 인한 급격한 퇴적물 유입이 원인이 되어 보다 빠른 속도로 퇴적된 층으로 추정하였다.

1999년부터는 시화방조제 남단에 위치한 배수갑문 조작을 통해 해수를 유통시켰으며, 시화호 내측의 수위를 -1El.m로 관리해왔다. 이러한 조치 이후 우음도는 육지화되었으며 i) 섬을 육지와 연결하는 도로 건설, ii) 물으로 드러난 간석지를 농지로 활용, iii) 논농사 확대에 따른 농업용수 수요 증가로 인해 우음도 남단 갯골을 막는 제방 건설, iv) 평택-시흥 고속도로 건설, v) 송산그린시티 개발사업의 일환인 우음도의 생태공원화 등의 인간 간섭을 경험하였다(그림 3). 이러한 인간간섭의 영향을 반영하여 2000년대 이후에는 이전 시기와는 비교할 수 없을 정도로 퇴적속도에 큰 변화가 나타난다(그림 6). 방조제 건설 이후의 항공사진에서는 갯골의 수평 규모가 지속적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다(그림 3).

간석지가 상시 노출되기 시작한 2000년부터 간척농지 면적이 꾸준히 증가하는 2006년까지의 퇴적속도는 0.63~37.33g/cm²/year이며, 평균 퇴적속도는 13.75g/cm²/year로 계산되었다. 또한 간척농지가 우음도를 둘러싼 간석지 대부분으로 확대되고, 섬을 남북으로 가로지르는 고속도로 건설공사가 진행되었던 2007년부터 2011년까지의 평균 퇴적속도는 42.61g/cm²/year로 추산되었다. 2007년 퇴적속도의 최대값인 97.89g/cm²/year가 나타났으며, 이 시기는 주민들이 농업용수 확보를 목적으로 우음도 남단의 갯골을 가로막는 제방을 쌓은 시기와 일치한다. 이는 우음도 남단 갯골의 가장 안쪽에 위치한 제방 상류부에서 급격히 증가한 간척농지로부터 유실된 토사유입의 증가 및 제방에 가로막혀 토사유출이 제한되는 환경으로부터 비롯된 것으로 해석할 수 있다. 2008년과 2009년에도 비교적 높은 퇴적속도가 나타나는데, 이는 2008년에 착공한 평택-시흥 고속도로 건설현장에서 우음도 남단 갯골의 상류부로 상당한 토사가 유입된 효과가 더해진 것으로 보인다.

송산그린시티 조성사업이 본격적으로 시행되기 시작

한 2012년부터 우음도에서의 논농사가 금지되었으며, 우음도의 생태공원화가 진행되었다. 섬을 남북으로 가로지르는 고속도로 건설이 마무리되었고, 토지가 수용되어 대부분의 땅이 녹지로 달라졌다. 이와 더불어 제방의 필요성이 사라져 제방 북쪽 갯골을 통해 조수가 드나들기 시작하였다. 코어 시료 채취 지점으로 유입되는 토사의 양이 감소했을 뿐만 아니라, 제방을 우회하는 갯골을 통해 토사유출이 일부 가능했을 것으로 판단된다. 이러한 환경변화를 반영하여 2012~2018년 동안의 평균 퇴적속도는 3.12g/cm²/year로, 이전 시기에 비해 크게 감소하였다.

4. 퇴적환경 변화와 인간 간섭 요인

코어 샘플 채취 지점 주변을 대상으로 방조제 건설 이전, 즉 자연상태의 조간대 환경이었던 시기부터 2018년까지의 시기별 퇴적환경, 인간 간섭 요인과 평균 퇴적률을 표 1에 정리하였다. 이를 종합하면, 조간대 환경에서의 퇴적률에 비해 방조제가 완공되어 담수호 환경이었던 1994년부터 1998년까지 퇴적속도가 약 3배 증가하였다. 이는 시화 방조제에 의해 외해의 영향이 차단되어 조류에 의한 물질의 운반과 퇴적이 이루어지지 않았고, 시화호 유역 상류로부터의 물질 유입은 계속되었기 때문으로 해석된다. 더불어 조간대 환경일 당시에 코어 샘플 채취 지점이 시화호 유입하천들의 유출구를 등지고 있어 상류로부터의 물질유입이 제한되는 환경이었고, 조수에 의한 물질의 이동은 우음도 남단의 동서 방향 갯골을 통해서 이루어졌으나 샘플 채취 지점이 간석지 안쪽에 위치하여 조류의 영향을 적게 받았기 때문에 조간대 환경에서의 퇴적률이 비교적 낮게 나타난 것으로 보인다.

그리고 우음도 남단 간석지의 경우 퇴적률이 급격하게 증가하는 시기는 간척농지 이용이 증가하여 갯골을 막고 제방을 쌓은 시기, 그리고 갯골 상류에서 이루어진 고속도로 건설공사 시기와 일치한다. 코어 샘플에서 가장 높은 퇴적속도가 나타난 해는 2007년으로 간척농지를 활용한 농사가 본격화되면서 토사유입은 증가하였으나, 갯골을 가로막는 방향으로 제방이 설치되어 토사유출이 제한되었던 시기에 해당한다. 우음도 남단 갯골에 직접적인 변형을 가했던 제방 건설이 조류 및 조류에 의한 물질의 이동에 지배적인 영향을 주었고, 이러한 인간 간섭이 퇴적속도에 가장 큰 영향을 미친 것으로 볼 수 있다. 이러한 영향이 지속되는 동시에 평택-시흥 고속도로 건설공사 현장에서 발생한 토사가 샘플 채취지점에 기여하였기 때문에, 2007년부터 2011년까지의 퇴적률은 담수호 환경이었던 시기(1994년~1998년)에 비해 약 30배 높은 것으로 나타났다. 이는 주조수호에서 벗어난 갯벌 내부의 퇴적률에는 시화 방조제의 건설보다도 인근에서 발생한 토사 유입과 유출 조건의 변화가 큰 영향을 미쳤음을 시사한다.

IV. 결론

대조차 환경인 우리나라 서해안에는 만일지를 중심으로 큰 규모의 간석지가 발달하였으나, 용지 확보를 위하여 대규모 간척사업이 추진되어 왔다. 경기만 남동쪽에 위치한 시화호는 1994년 방조제 완공에 의해 외해와 단절되었으며, 잇따른 수질악화 문제로 해수호로 관리되고 있다. 본 연구의 목적은 시화호 내측에 위치한 우음도를 중심으로 시기별 환경변화를 분석하고 코어 샘플

표 1. 코어 샘플 지점 주변의 시기별 퇴적환경과 평균 퇴적률 및 인간 간섭 요인

시기	퇴적환경	인간 간섭 요인	평균 퇴적률 (g/cm ² /year)
1987년 이전	조간대 환경	자연상태에 가까움	0.46
1987년~1993년		방조제 공사	1.00
1994년~1998년	담수호 환경	방조제 완공 이후 조석 영향 받지 않음	1.32
2000년~2006년	간석지가 상시 노출됨	우음도 육지화, 우음도와 육지를 연결하는 도로 건설, 간척농지 증가	13.75
2007년~2011년	제방 상류 보 환경 (민물 담수)	농경지 확대 및 평택-시흥 고속도로 건설로 토사 유입 증가함, 제방에 의해 토사 유출 제한됨	42.61
2012년~2018년		논농사 금지, 우음도의 생태공원화 (송산그린시티 조성사업)	3.12

에 기록된 퇴적환경을 복원하는 것이다.

1980년대 말부터 2010년 말까지 시화호 유역에서 농경지와 삼림 면적이 감소하고 공업단지를 포함한 시화호화면적이 크게 증가하였다. 시화호 방조제 내측 간석지의 면적변화에 가장 큰 영향을 준 것은 해수유통과 더불어 시화호 내측의 수위를 -1El.m로 관리하면서 비교적 지면고도가 높은 간석지가 육화된 것이다. 시화호 종합관리계획이 단계별로 이행되면서 시화호 북측과 남측 간석지를 대상으로 한 개발사업이 차례로 진행되었다. 우음도는 육지화된 이후, 2000년부터 2011년까지 섬을 둘러싼 간석지를 농경지로 이용하였다. 농업용수 확보를 위하여 다수의 저수지를 조성하였으며 2007년 우음도 남단 갯골을 가로막는 제방을 쌓았다. 2008년부터 2012년까지 우음도를 남북으로 가로지르는 평택-시흥 고속도로 건설 공사가 진행되어 토양이 교란되었다. 수자원공사에 의해 토지가 수용되고 우음도의 생태공원이화가 본격적으로 진행되었던 2012년 이후로 우음도에서의 농사는 금지되었고, 대부분이 녹지로 변화했다.

남 동위원소 연대측정과 이에 기반한 퇴적물 분석 결과, 조간대 환경에서의 퇴적물에 비해 방조제가 완공되어 담수호 환경이었던 1994년부터 1998년까지의 퇴적속도는 약 3배 증가한 것으로 나타났다. 이는 방조제에 의해 외해 및 조류의 영향이 차단된 저에너지 환경에서 유역 내에서 공급되는 물질의 퇴적이 활발하게 일어났기 때문으로 판단된다. 담수호 환경이었던 시기에 비해 약 30배 높은 퇴적률이 기록된 시기는 간척농지 이용이 증가하여 갯골을 막고 제방을 쌓아 보 환경이 조성되었던 시기, 그리고 갯골 상류에서 이루어진 고속도로 건설공사 시기와 일치하는 것으로 나타났다. 이를 통해 주조수로에서 벗어난 갯벌 내부의 퇴적물에는 시화 방조제의 건설보다도 인근에서 발생한 토사 유입과 유출 조건의 변화가 큰 영향을 미쳤음을 확인하였다.

본 연구는 코어 샘플 한 공으로 우음도 전체의 퇴적환경 변화를 추정하였다는 점과 인간간섭 요인들의 영향 정도를 정량화 하지 못했다는 한계가 있지만, 우음도의 퇴적환경 변화를 이해하는 데 있어 기초적인 근거를 제시하였다는 점에서 의의가 있다. 나아가 최근 진행 중인 송산그린시티 개발사업과 우음도의 생태공원화 및 지속가능한 연안환경 관리를 위한 계획수립에 본 연구결과가 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 국토해양부, 2009, 「시화호 해양환경 개선 사업」.
- 국토해양부, 2011, 「시화호 연안환경관리 백서」.
- 김경태·김은수·조성록·박준건·박청길, 2003, “시화호 및 주변 하천 표층 퇴적물의 중금속 분포 변화” *Ocean and Polar Research*, 25(4), 447-457.
- 류종성·최진우·강성길·고철환·허성희, 1997, “시화 방조제 건설 이후 시화호 다모류의 종조성 및 서식밀도 변화” *한국해양학회지 바다*, 2(2), 101-109.
- 박용안·임동일·김수정, 2000, “한국 서해 경기만 반월 조간대(상부조간대) 퇴적층의 제4기 후기 층서와 부정합” *제4기학회지*, 14(2), 125-135.
- 박준건·김은수·조성록·김경태·박용철, 2003, “시화호 수질의 연변화 양상에 대한 연구” *Ocean and Polar Research*, 25(4), 459-468.
- 양소연·송무영·황정, 1999, “원격탐사와 지리정보시스템을 이용한 시화지구 일대의 지표환경변화와 토공량 예측 연구” *지질공학회지*, 9(2), 161-176.
- 오해중·안희도·磯部雅彦·佐藤慎司·정갑식·조진형·鯉淵宰生, 2006, “시화호 배수갑문 개방 후의 수질 및 퇴적환경 변화” *한국해양환경·에너지학회 학술대회논문집*, 31-36.
- 우한준·장석·권수재, 2012, “강화 동검도 동부 갯벌의 퇴적 특성 변화” *한국습지학회지*, 14(3), 375-384.
- 우한준·최재용·안순모·권수재·구본주, 2006, “새만금 갯벌의 퇴적환경 변화” *Ocean and Polar Research*, 28(4), 361-368.
- 이준호·정갑식·우한준·조진형·이승용·장석, 2011, “시화호형도 갯벌의 지하화적 특성 분석” *한국습지학회지*, 13(2), 243-263.
- 이현영·이승호, 1997, “한국의 대규모 간척사업이 주변의 환경 변화에 미치는 영향” *대한지리학회지*, 32(4), 463-478.
- 이희준·조형래·김민지, 2006, “새만금방조제 축조에 따른 지형 및 입도특성의 변화” *Ocean and Polar Research*, 28(3), 293-303.
- 조명화·조화룡, 1997, “한국의 간석지 분포” *한국지역지리학회지*, 3(2), 195-208.
- 최만식·천종화·우한준·이희일, 1999, “시화호 표층퇴적물의 중금속 및 퇴적상 변화” *한국환경과학회지*, 8(5), 593-600.
- 최정훈·강정원·홍대벽·박용안, 2000, “시화호 퇴적물의 유

- 기탄소, 유기질소 및 중금속 함량과 분포, 한국해양학회지, 5(4), 276-284.
- 해양수산부, 2001, 「환경관리해역 시범해역관리 시행계획 수립연구 - 시화호 특별관리해역 현황」.
- 해양수산부, 2005, 「시화호 해양환경 개선 사업」.
- 화성시·화성문화원, 2007, 「구비전승 및 민속자료 조사집 5: 경기도 화성시 송산면편, 화성시: 화성문화원
- Ahn, Y.S., Nakamura, F., and Chun, K.W., 2010, Recent history of sediment dynamics in Lake Toro and applicability of ^{210}Pb dating in a highly disturbed catchment in northern Japan, *Geomorphology*, 114(3), 284-293.
- Appleby, P.G. and Oldfield, F., 1978, The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment, *Catena*, 5(1), 1-8.
- Appleby, P.G. and Oldfield, F., 1983, The assessment of ^{210}Pb data from sites with varying sediment accumulation rates, *Hydrobiologia*, 103(1), 29-35.
- Hong, S., Won, E.-J., Ju, H.-J., Kim, M.-S., and Shin, K.-H., 2010, Current nonylphenol pollution and the past 30 years record in an artificial Lake Shihwa, Korea, *Marine Pollution Bulletin*, 60(2), 308-313.
- Lee, C.-B., Park, Y.-A., and Koh, C.-H., 1985, Sedimentology and geochemical properties of intertidal surface sediments of the Banweol area in the southern part of Kyeonggi Bay, Korea, *The Journal of the Oceanological Society of Korea*, 20(3), 20-29.
- Lee, H.J. and Ryu, S.O., 2008, Changes in topography and surface sediments by the Saemangeum dyke in an estuarine complex, west coast of Korea, *Continental Shelf Research*, 28(9), 1177-1189.
- Lee, H.J., Chu, Y.S., and Park, Y.A., 1999, Sedimentary processes of fine-grained material and the effect of seawall construction in the Daeho macrotidal flat-nearshore area, northern west coast of Korea, *Marine Geology*, 157(3-4), 171-184.
- Marsh, W.M. and Gossa Jr, J., 1996, *Environmental Geography: Science, Land Use, and Earth Systems*, New York: John Wiley and Sons.
- Park, Y.-G., Kim, H.-Y., Hwang, J.H., Kim, T., Park, S., Nam, J.-H., and Seo, Y.-K., 2014, Dynamics of dike effects on tidal circulation around Saemangeum, Korea, *Ocean and Coastal Management*, 102, 572-582.
- Pennington, W., Cambay, R., Eakins, J., and Harkness, D., 1976, Radionuclide dating of the recent sediments of Blelham Tarn, *Freshwater Biology*, 6(4), 317-331.
- Ra, K., Bang, J.-H., Lee, J.-M., Kim, K.-T., and Kim, E.-S., 2011, The extent and historical trend of metal pollution recorded in core sediments from the artificial Lake Shihwa, Korea, *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1814-1821.
- Ryu, J., Nam, J., Park, J., Kwon, B.-O., Lee, J.-H., Song, S.J., Hong, S., Chang, W.K., and Khim, J.S., 2014, The Saemangeum tidal flat: long-term environmental and ecological changes in marine benthic flora and fauna in relation to the embankment, *Ocean and Coastal Management*, 102, 559-571.
- Schelske, C.L., Peplow, A., Brenner, M., and Spencer, C. N., 1994, Low-background gamma counting: applications for ^{210}Pb dating of sediments, *Journal of Paleolimnology*, 10, 115-128.
- 대한경제, 2011년 5월 26일자, “개발과 환경 조화...철새서식지 설계용역 ‘쑥쑥”
- 국토지리정보원, www.ngii.go.kr
- 인양천생태이야기관 <https://www.anyang.go.kr/river/index.do>
- 화성시청, <https://air.hscity.go.kr/hsgisMap/map/map5.do>
- vworld 오픈API, <https://www.vworld.kr/dev/v4api.do>
- 교신 : 김진관, 61186, 광주광역시 북구 용봉로 77, 전남대학교 사범대학 지리교육과(이메일: jinkwankim77@gmail.com)
- Correspondence: Jin Kwan Kim, 61186, 77, Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, Korea, Department of Geography Education, College of Education, Chonnam National University (Email: jinkwankim77@gmail.com)
- 투고접수일: 2023년 2월 28일
심사완료일: 2023년 3월 15일
게재확정일: 2023년 3월 20일