

2차시. 해양생태계와 오염의 이해

<2차시. 해양생태계와 오염의 이해>

1 해양생태계

가. 해양 역할

해양은 지구면적의 약 70%를 차지하고 있으며, 인류는 해양으로부터 귀중한 생물자원 및 광물자원을 획득하여 왔으며 해상수송 및 교역의 통로로 활용하여 오고 있다. 해양은 이러한 경제적 이익 외에도 관광 및 여가활동에 있어서도 큰 역할을 하고 있다.

해양은 6억년 전부터 침전제거와 균형을 이루어 해수의 화학적인 조성면에서 정상상태(steady state)를 유지하여 현재에 이르고 있다. 해수 중의 화학원소의 유입과 제거가 균형을 이루어 평형론으로는 해수가 지화학적 평형에 이르렀다고 할 수 있다. 지구상의 생태계는 이러한 해수의 화학적 조성이 평형상태에서 진화되어 왔으며 적응이 되어 있다. 지금은 이렇게 오랫동안 유지되어 왔던 해수 정상상태가 위협받고 있다. 해양은 지구환경에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 지구온난화문제의 방지, 해양식물 광합성에 의한 대기의 정화작용, 육상으로부터 배출되는 폐수 및 하수의 최종적인 자정작용, 갯벌에서의 중금속 및 유기물질의 흡수제거작용, 식량 및 광물자원의 제공 그리고 휴식공간의 제공 등이다.

나. 해양 환경문제

근대 산업화가 진행되면서 해상활동이 활발해짐에 따라 강과 바다가 인접하는 강하구 및 임해 대도시 주변 연안, 항만주변은 인간이 직·간접적으로 배출하는 많은 오염물질과 에너지에 의해 환경변화가 일어나 자연생태계의 균형이 파괴되고 이에 따른 환경문제가 대두되기 시작했다. 해양에서의 환경문제는 국지적인 장소에 국한되지 않고 유체라는 매질의 연결성에 있어서 광역적인 면으로 발전하는 경우가 많다.

다. 해양생태계

해양생태계는 대체로 서식환경에 따라 부유생물군, 유영생물군, 그리고 저서생물군으로 나뉘어진다. 유영생물군은 대부분의 어류와 고래와 같은 포유류가 포함된다. 저서생물군은 퇴적물 속이나 해수가 접촉하는 지반을 주 서식처로 하는 저서식·동물 등이 포함된다. 이들 생물군은 각각의 서식환경에서 안정된 먹이사슬과 먹이망 아래 에너지를 주고 받으며 생화학적 유·무기물의 순환과정인 생태계를 유지하고 있다.

해양생태계 에너지 흐름에서 가장 중요하고 기본적인 것은 광합성 능력을 갖고 있는 해양식물성플랑크톤과 해조류(저서식물)로서 가장 큰 생체량과 종 다양성을 갖고 있다. 해양에서의 생태계 안정도는 플랑크톤 군집의 안정도에 거의 좌우된다고 볼 수 있다.

2차시. 해양생태계와 오염의 이해

대체로 해양생태계 먹이사슬단계는 육상보다는 다소 길어 연안역에서는 3단계이나 대부분의 외양역에서는 5단계에 이른다. 연안역은 외양역에 비해 종 다양성 지수가 비교적 낮으며 먹이망도 단순한 편이다. 우리에게 대부분의 식량자원을 제공하고 생물생산력이 가장 큰 연안역은 육상으로부터 상당량의 오염물질을 받아들이고 있다. 이러한 육상으로부터의 오염물질과 폐열 등의 에너지 유입은 기초생태계 구성원인 식물플랑크톤 군집의 종 구성에 큰 영향을 주어 생태계를 불안정하게 만든다.

2. 해양생태계 오염물질 유입과 이동

해양생태계 오염물질은 육지에서 오는 것과 해양 사고에서 오는 것으로 구분할 수 있다.

가. 육상기인 오염

하천수로부터 과다하게 유입된 영양염류와 유기물은 부영양화를 유발시켜 특정 식물플랑크톤이 대량번식하게 되는 적조(red tide) 현상을 일으킨다. 적조는 단순한 먹이망과 짧은 먹이연쇄를 파괴시켜 전체적인 연안생태계의 불안정과 이에 따른 생물자정능력을 크게 훼손시킨다. 또한 적조 직후에는 유·무기 영양물질의 고갈로 인하여 적조원인생물의 대량 폐사가 일어나며 대부분 저층으로 가라앉아 분해된다. 이러한 분해과정에서 다량의 해수중의 용존산소가 고갈되어 적조발생 연안해역에서 무산소 수괴를 형성하게 된다. 이러한 무산소 환경과, 적조원인 생물로부터 분비된 독성물질은 대부분의 어패류 양식에 치명적인 피해를 주게된다. 우리나라 남서해에서는 최근 이러한 적조 피해가 빈번하게 되풀이되는 해역이 많은데 대부분 이러한 해역은 외해수와의 해수교환이 원활하지 못하거나 연안 주변 도시로부터 오폐수와 산업폐수의 유입이 상대적으로 큰 연안환경에 속한다. 적조현상은 생물자원의 생산력을 감소시키는 직접적인 경제적 손실 이외에도 간접적으로는 연안역의 가장 중요한 기능인 생물에 의한 자정능력을 감소시켜 거시적으로는 해양환경용량의 손실에 따른 지구환경 악화의 방지기능이 저하된다. 이를 막기 위해서는 전세계적으로 육상 오폐수의 처리능력을 높여 최소한 해양의 자정능력을 초과하지 않도록 해야 한다.

우리나라의 경우 약 80%의 도시하수, 공장폐수 등의 육상오염물질이 해양으로 유입되고 있는 것으로 알려져 있는데 이중 생활하수는 하루 천만톤 정도 해양으로 유입되고 있다. 국지적으로 과도한 오폐수의 유입은 해당 연안의 환경용량을 초과하여 생태계를 파괴시키고 오염물질이 축적되어 정상적인 생태계로 환원되는 데에는 상당한 시간과 노력이 필요하게 된다.

산업폐수중에는 생물학적으로 분해되거나 제거되지 않는 PCB, DDT, 유기인 농약제제 및 중금속 등이 포함되어 있다. 이중 PCB나 DDT 등은 자연적으로 존재하지 않는 합성물질로

2차시. 해양생태계와 오염의 이해

완전히 인간에 의해 남겨진 지구상 공해물질의 대표적인 물질이다. 생물분해가 되지 않는 물질은 BOD성 오염물질이나 영양염류와는 달리 극소량의 농도로서 극대의 독성을 갖는 특성을 갖고 있다. 이러한 물질들은 먹이사슬의 가장 기초적 단계인 플랑크톤 군집에 흡수되어 농축되는 생물농축과정(bioaccumulation)을 갖는다. 생물농축과정은 주로 연안역에서 일어나게 되며 연이어 먹이사슬을 통하여 전이되는 과정에서 상위 포식자로 갈수록 오염물질의 농도가 증가되는 생물확대현상(biomanification)이 일어난다. 육지의 농축산물에서 인간에까지 먹이사슬단계보다 해산물의 인간섭취까지 먹이사슬단계가 최소 1~2단계 길기 때문에 그 심각성은 더 크다는 것이다. 따라서 산업폐수의 경우는 육상으로부터 해양 유입이 철저하게 규제되어야 한다. 해양으로 유입된 대부분의 육상기원 물질들은 수용액 상태로 유입되어 해수중의 생물·지화학적인 과정을 거쳐 침전되는 부분과 용존상태로 존재하는 부분으로 나뉜다. 생물친화원소인 탄소, 질소, 인, 규소 등은 유기물과 무기물의 산화·환원과정을 거쳐 합성되거나 분해되는 순환과정을 거쳐 해수중에 존재한다. 이에 비하여 미량금속 중 일부는 담수가 해수와 혼합되는 강하구역에서 유기물과의 착화합물의 형태로 또는 부유점토광물로 흡착되어 상당부분이 포획 제거된다. 따라서 하구역은 유기물과 중금속 등이 제거되는 매우 중요한 환경임을 알 수 있다. 대부분의 하구역 부근에는 넓은 간석지가 잘 발달되어 있는데 이러한 연안역에서의 갯벌지역은 조수간만의 차에 의해 많은 양의 오염수가 왕복접촉하여 상당부분의 유기물 및 중금속, PCB등을 흡착시켜 제거시켜주는 매우 중요한 역할을 하고 있다. 따라서 연안역의 갯벌지역은 연안오염을 방지시켜주는 일차적인 자연의 오염처리시설로서 그 가치는 육상의 어떠한 정화처리시설보다 크다고 할 수 있다.

나. 해양사고로 인한 유류오염

최근 에너지 수요와 석유화학산업의 발달에 따라 많은 양의 원유 및 유가공 화학물질의 해상운송이 증대하고 있다. 이에 따라 해상에서의 선박사고와 유조선 운항관리과정에서 해양으로 유입되는 유류에 의한 오염피해 또한 매우 심각해지고 있다. 현재 전 세계적으로 해양으로 유입되는 유류의 총량은 약 5백만 톤이 넘는 것으로 알려져 있다. 이 중에서 유조선 및 기타 선박의 충돌, 조난 등의 일시적인 해난사고에 의한 유류의 총량은 매년 약 40만 톤으로 전 세계 유류오염의 약 10% 정도이다. 나머지 90%는 거의 만성적으로 해양에 유입되고 있다. 하지만 사고에 의한 피해는 국지적인 연안에서 일시에 발생하여 급성적으로 부근 연안을 오염시키고 주변 환경에 영향을 주므로 그 실질효과는 매우 크다. 해양에서 발생하는 오염의 형태 중 가장 적나라하고 시각적인 효과와 일반인의 오염피해의식이 가장 큰 오염은 바로 이러한 사고에 의한 유류오염이다. 일반적으로 중금속, 영양염류 등은 해수 중에서 용존되어 3차원적인 분산에 속하나 유류는 표면에 수백 μm 의 얇은 유막층을

2차시. 해양생태계와 오염의 이해

형성하여 확산되므로 이에 따른 2차적인 피해면적은 순식간에 늘어난다. 대체로 해양에 유출된 유류는 표면에서 유막을 형성하여 대략 해상풍 속도의 3~4% 속도로 이동되어 수역 내에 넓은 해역에 분산된다. 동시에 표층의 유막에서는 증발현상이 일어나 대부분 분자량이 작은 탄화수소 부분이 대기로 방출된 후 상당시간에 걸쳐 해수 중에 일부 용해되거나 해수중의 입자나 유기물에 응축되어 침전되기도 한다. 하지만 최종적으로 해양 석유분해 가능 미생물에 의한 완전한 생물학적 분해에는 수년이 걸리기도 한다.

다. 해양에서 오염물질의 이동

유출된 유류 중 분자량이 큰 탄화수소 부분들은 해상의 파도가 크고 와류에 의한 유동이 클수록 유류덩어리(tar ball)을 형성하여 침전되거나 해안으로 밀려와 상당부분의 해변, 양식장 구리고 조간대를 오염시킨다. 우리나라와 같이 김과 패류 양식업이 매우 중요한 연안환경에서는 이에 대한 피해가 심각하다. 유출된 유류의 제거방법에는 유류제거선, 침전법, 유흡착제 이용 등 물리적인 제거방법과 화학적 유처리제에 의한 수중분산 방법이 현재 세계적으로 가장 널리 사용되고 있다. 물리적인 제거방법은 해상조건에 따라 효율성의 차이가 크다. 이에 비해 유처리제 사용은 단기간에 표면의 유막을 신속하게 제거시켜 주기 때문에 피해면적을 줄일 수 있으나 사용되는 유처리제의 2차 독성 때문에 결과적으로 해양생태 및 수산생물에 미치는 악영향이 증가되는 경우가 있다. 해양에 유입된 유류의 성분은 크게 생물분해가 가능한 탄화수소 부분과 생물분해가 매우 어려운 방향족 탄화수소로 나누어지는데 생물독성은 주로 방향족 화합물에 의해 일어난다. 대체로 정제되지 않은 원유에는 약 30% 내외의 방향족 화합물이 포함되어 있으며 독성이 큰 디젤 같은 경우 40% 이상이 포함되어 있다. 특히 다수의 방향족 벤젠고리가 결합된 다방향족 탄화수소류(PAH: polycyclic aromatic hydrocarbon)중 benzopyrene은 해양 생태계의 먹이연쇄를 통해 독성물질의 생물농축과정에 의하여 인간의 건강에 영향을 줄 수도 있다. 유류의 독성은 해저에 침전된 유분에 의해 어란 및 치자어 등이 영향을 받을 수 있다. 해저나 조간대, 해안가에서 고착생활을 하는 저서식물과 동물군집에 대한 피해는 매우 심대한 것으로 밝혀져 있다. 유류오염 사고 후 상당부분은 침전되거나 연안의 해변가에 최종적으로 침적되어 매우 오랫동안 저서생물의 서식환경을 파괴한다. 대부분의 유류오염 사고 해역주변의 군집은 그 회복기간이 5년에서 10년 정도 까지 걸리는 것으로 알려져 있다. 외국과 달리 조류와 패류에 대한 수산물 섭취 의존도가 큰 우리나라의 경우 수산양식업의 피해가 극심한 편이다.

2차시. 해양생태계와 오염의 이해

3. 지구온난화에 대한 해양의 역할

인류는 산업혁명 이후 급격히 요구되는 많은 양의 에너지를 화석연료에 의지하여 왔다. 이러한 화석연료는 실제 상당히 오랫동안 생물체의 축적과 화학적 변화과정을 거쳐 탄화수소류들만이 석화되거나 또는 유체로서 퇴적암층에 존재하던 것을 수십년에 불과한 시간에 인간의 산업활동에 의해 소모되고 있는 것이다. 이에 따라 방출되고 있는 이산화탄소량은 급증하여 현재의 대기 이산화탄소 농도는 앞으로 20년 후에는 약 2배로 늘어날 예정이다. 대기 중의 이산화탄소 농도의 증가는 지구환경 전반에 영향을 준다. 대기 중의 이산화탄소 농도증가는 태양광이 입사된 후 복사열이 대기 중의 이산화탄소에 흡수되어 지구외로 방출이 되지 않기 때문에 온실효과(greenhouse effect)를 일으켜 지구의 온난화 현상을 일으킨다. 대기의 온난화는 해양에도 심대한 영향을 미칠 수 있다. 우선 대기권의 바람의 흐름이 달라지게 되고 이는 연이어 해양 표층의 해류 변화에 큰 영향을 미친다. 이러한 해류의 변화는 남미 페루 해역과 적도 해역에서 잘 알려진 엘니뇨 현상의 원인이 된다. 엘니뇨 현상이 있게 되면 부근 해역에서는 심해로부터의 영양염류의 공급이 단절되어 막대한 어장의 손실을 갖게 된다. 한편 지구의 온난화는 남극과 북극의 빙하를 녹여 결과적으로 해수면이 상승되어 대부분의 연안 지역의 변화가 예상된다. 또한 극지방은 해양의 밀도류가 형성되는 해류 역학적으로 매우 중요한 곳인데 지구의 온난화로 인하여 이러한 밀도류에 의한 해양의 수직적 해류순환이 느려지고 이에 따른 원소순환의 저해, 심층수의 산소고갈 등의 해양환경 변화가 있을 수 있다. 그런데 해양은 대기의 온난화에 대하여 수동적인 역할만 하고 있지는 않다. 사실 해양은 대기와 매우 밀접하게 상호 에너지 교환과 물질의 교환을 하고 있다. 그 중 산소, 이산화탄소와 같은 기체의 교환은 상당히 원활하게 이루어지고 있다. 대기 중의 대부분의 기체(헬륨, 아르곤, 질소, 이산화탄소, 산소)는 해표면 막을 통하여 교환을 하여 기체 분압의 평형을 유지한다. 대기 중의 이산화탄소 분압의 증가는 곧 해수 중의 이산화탄소 분압과 일정한 평형을 이루기 위하여 대기에서 해양으로 이산화탄소가 유입되어 용존된다. 해수에 용존된 이산화탄소는 해수의 pH(약 8.1) 조건 하에서 대부분 HCO_3^- 형태로 녹아 있으며 표층에서 식물플랑크톤에 의한 광합성에 의하여 입자 유기탄소로 전환되어 그 중 일부분이 해저로 침강·퇴적되어 제거된다. 따라서 해양은 이산화탄소에 관하여 상당한 완충역할 내지 대기 중 증가되는 이산화탄소 제거 역할을 하게 된다. 최근에는 해양의 광합성 능력을 최대한로 고양시켜 대기 중에 증가되는 이산화탄소를 제거하고자 하는 연구가 매우 활발히 진행 중이다.

대기의 이산화탄소 분압은 산업혁명 이전에는 243~290ppm, 1959년 316ppm, 1988년 351ppm으로 증가되었다. 대기의 이산화탄소 농도 또한 2020년경에는 이 추세라면 현재보다 2배 가까이 증가될 것으로 보인다. 인간의 산업활동에 의해 대기 중 방출된 과잉

2차시. 해양생태계와 오염의 이해

이산화탄소의 상당부분(40%)이 해양에 의해 흡수된다. 대기중의 이산화탄소 농도가 증가될수록 대기에서 해양으로의 이산화탄소 유입현상이 일어나 해수 중의 이산화탄소 농도도 증가된다. 그러나 해수의 pH는 해수 중의 알카리 농도와 큰 관계로 완충되어 대기 이산화탄소의 해양 유입으로 인하여 앞으로 해수중의 이산화탄소 농도가 2배로 증가되더라도 실질적인 pH변화는 8.7에서 7.9로 약간 변하게 된다. 대부분의 해양에서 식물성플랑크톤은 영양염류 또는 미량금속 등의 결핍으로 최대의 광합성 능력을 발휘하기 못한다. 그러나 만일 지금과 같이 대기의 이산화탄소가 급증하는 상황에서 부족한 영양염류 또는 미량금속을 해양에 투입하여 광합성 능력을 크게 촉진시킨다면 현재의 유기탄소의 침강에 의한 해양에서의 이산화탄소 제거가 크게 증가될 것이며 희망적으로는 지구 온난화 문제가 상당히 해결될 수도 있을 것이다.

지구온난화의 주 원인인 이산화탄소의 대기 중 농도증가는 대부분 일간활동에 의한 화석연료 소모와 삼림의 파괴가 가장 큰 문제이다. 인류가 해양에 공해물질 등을 파괴시킨다면 광합성 능력이 저하되어 대기와 해양에 증가되는 이산화탄소를 제거하지 못하게 되어 지구 온난화를 가속 시킨다는 사실은 매우 자명하다. 해양은 대기 중의 이산화탄소 총량보다 자그만치 52배나 많은 이산화탄소 농도를 갖고 있다.