人間과 바다의 物質循環

崔 榮 博 〈高麗大學校 土木工學科 敎授〉

바다의 은혜

바다는 우리들 인간생명이 탄생하기 이전 수십억년전에 오늘날의 모습으로 되었다 한다. 생명 그 자체의 모체가 바다였다고 생각되고 있는 바와 같이 바다는 우리들 인간을 포함하여 생물에 유형무형의 은혜를 주어왔다.

▶ 과거의 바다

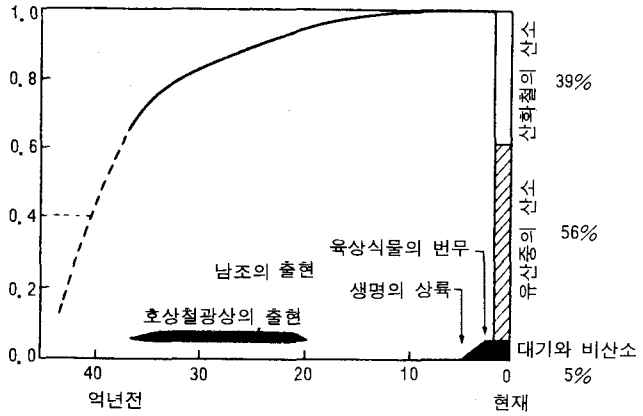
먼 옛날 광합성을 행하는 녹색식물이 간신히 나타난 시대에 바다 그 자체는 상당히 환원상태에 있었다고 생각되었다.

이때의 바다에는 철이온이나 유황이 많이 존재했다는 증거가 있는데 초기의 광합성생물에 의해 만들어진 산소의 대부분은 해수중의 이들 철이온이나 유황의 산화에 사용되고 그 후 대기중에 서서히 축적되었다고 생각해도 좋다. 이 시기에 산화철로 침전한 철이 줄무늬상의 광상(鑛床)으로서 해양속에 남아있고 오늘날 사람들이 사용하는 철의 대부분은 이 시기에 바다에서 만들어진 것이라 한다.

현재 지구에서는
인구의 증가에 수반하는
식량·에너지문제가
바로 21세기를 앞두고
날마다 해마다
심각해지고 있다.
지구표면의 2/3를
차지하는 해양은
어떤 가능성을
가지고 있는가를
생각해 보자.

광합성활동이 더욱 활발해지자 지표에는 산소가 서서히 고이게 되었다. 그런데 잘 생각하면 광합성에서 만들어진 유기물은 어느시간이 지나면 산소를 소비해서 탄산가스와 물로 되돌아오고 만다. 이래서는 대기중에 산소를 저장할 수가 없다. 대기중에 산소가 증가되도록 하기 위해서는 유기물이 분해를 면해야 하는데 어느곳에든 매몰되어야 한다. 이 매몰의 유력한 담당물은 해양바닥에 형성된 퇴적물이다.

현재 지구상에서 광합성에 의해 생산되는 유기물의 0.1%가 해양바닥에 퇴적물로서 매몰된다. 이 얼마 안되는 유기물의 매몰이 대기중에 산소를 증가



▲ 광합성에 의해 방출된 산소량의 시간변화 (1.0은 현재까지의 량)과 그 행방

시키는 원동력이 되는 것이다. 바다는 대기중의 산소를 저장하는 추진력이 되고 있다. 현재 광합성에 의해 만들어진 산소는 산화철로서 39%, 유황을 산화해서 유황이온의 형으로 되어 있는 것이 56%로서 대기중에는 겨우 5%만 남고 있다.

▶ 20세기의 바다

패총에서 명백히 나타난 바와 같이 바다는 인간에게 있어서 귀중한 식료를 얻기 위한 터전이었다. 이것은 오늘날에도 변함이 없고 물고기와 조개의 소위, 어개류, 해조는 인류의 식생활의 일부를 담당하고 있다. 과학기술의 발달과 함께 바다는 또한 중요한 물자수송, 교역의 장으로 되었다. 육상수송에 비해 바다는 아무런 장해물없이 대량의 상품을 값싸게 운반·수송하는 장소로 되고 있다. 3면이 바다인 우리나라는 반도국으로 1960년대부터 경제의 고도성장과 함께 단기간에 공업입국으로 강력하게 발전한 이유의 하나는 바다에 의한 해외수출이 쉽게 이루어진 까닭이다.

바다는 또한 우수에 의한 수자원의 공급원으로 되고 있다. 육상에 내리는 빗물은 거의가 바다표면에서 증발한 수증기를 출발물질로 하고 있다. 해수의 담수화는 오늘날 현실면에서 중동사막지대에 있어서 각종 생활, 공업, 산업용수 확보의 방책으로 개발되고 있다. 우리나라에 연중행사처럼 내습하는 여름장마철의 태풍이나 집중호우 등은 직접적으로 수해를 크게 주는 자연현상이나 수자원, 국토의 정화면에서 대국적으로 볼 때 눈으로 볼 수 없지만 큰 은혜를 주고 있다.

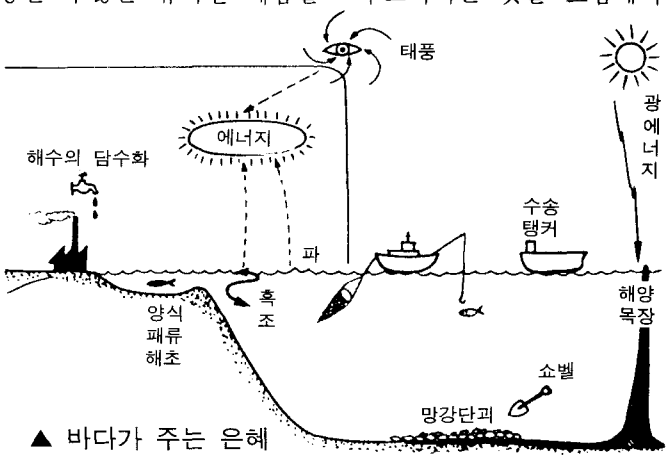
또한 바다중의 여러 물질의 이용은 수많은 유익한 제품을 우리 인류에게 제공하고 있다.

▶ 미래의 바다

옛부터 오늘날까지 탈질균은 농업에 있어서는 유해작용을 하기 때문에 경작면에서는 적이었다. 그런데 오늘날 물처리 문제가 큰 환경문제로 등장되자 탈질균은 물의 정화의 주역으로 무대에 나와 좋은 미생물로서 각광을 받게 되었다. 기술개발, 그리고 이에 수반하는 물질순환의 질의 전환은 여러 가치관을 뒤집어놓는 경우가 많다. 그 중 태풍은 그 좋은 예라고 생각된다.

현재 지구에서는 인구의 증가에 수반하는 식량·에너지 문제가 바로 21세기를 앞두고 날마다 해마다 심각해지고 있다. 지구표면의 2/3를 차지하는 해양은 어떤 가능성을 가지고 있는가를 생각해 보자.

우리나라는 자연자원이 풍족하지 못한 자원소국이라고 하여도 좋다. 하지만 3면이 바다인 좋은 조건을 가지고 있기에 그 특징의 하나인 지난날의 탈질균과 같이 현재는 피해쪽이 두드러지는 것을 포함해서 좋



▲ 바다가 주는 은혜

은 조건이라는 입장에서 생각해 보기로 한다.

① 강우량의 비교적 큰 혜택을 받고 있으며 바다에 가까운 소나기도 많다. 따라서 산성비도 비교적 적어 화석연료를 사용하는 데 있어서 대륙국보다는 좋은 조건에 있다.

② 해마다 3~4회의 태풍이 있어서 수백억톤의 물과 에너지를 운반해오고 있다.

③ 근해에 2대해류인 흑조(구로시오), 친조(오야시오)가 있어서 비교적 깨끗한 해수와 막대한 에너지를 운반하고 있다.

④ 수산국이 될 수 있다. 앞으로 해양목장을 조성하기 위한 연안이나 수변공간이 풍부하다.

앞으로 풍력발전, 조력발전, 양수발전, 수산양식 등이 가능하여 우리도 21세기를 위해 지구의 관리·유효이용을 위해 진전할 소지를 가지고 있다.

인체는 폐(공기), 수분(바다), 육체(흙)로 된 고전적인 생각을 다시 보고 반성해서 대기나 바다도 우리 몸과 같다고 생각해서 행동하는 시대에 가까워지고 있다고 전망할 수 있다.

바다에서의 물질순환

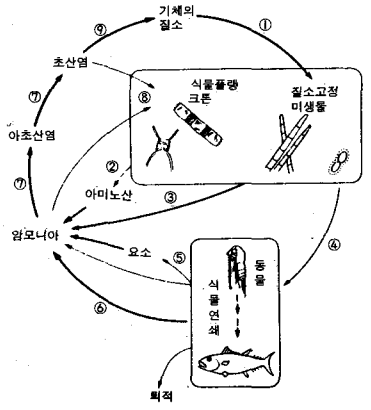
옛부터 「만물은 유전한다」라고 하였는데 바다속에서도 모든 것이 움직이고 흐르며, 그리하여 생성과 소멸의 역사를 반복하고 있다. 바다의 표층을 영원히 떠돌고 있는 것같이 볼 수 있는 무수의 규조(硅藻)플랭크톤의 집단도 그 속의 개개별 규조에 대해 관찰하면 혹은 먹이게 되고 혹은 죽고 시시각각으로 그의 생을 끝내고 있다. 하지만 한편으로는 집단중에서 계속해서 새로운 규조가 탄생하고 종자로서의 생명을 보전하고 있다. 이 규조를 먹고 있는 동물플랭크톤도 거기에다 이것을 먹이로 하는 고기(魚類)도 바다속에서 살고 있는 것은 모두 같은 운명을 더듬고 있다.

▶ 물질순환과 미생물

바다 생물의 죽음과 재생의 이와같은 과정중에서 생물체를 구성하는 원소, 예컨데 탄소, 산소, 질소, 인, 유황 등은 복잡하게 그 형을 변화하면서 생물과 외계의 사이를 왔다갔다 하고 있다. 그리고 원소가 이와같은 형을 바꾸게 될 때 많은 경우 바다속의 가시할 수 없는 미생물, 그 중에도 박테리아 즉, 세균은 이들 변화의 담당자가 되고 있는 것을 발견할 수 있다. 예컨대 질소의 그 변화를 살펴보자. 질소는 잘 알다시피 공기의 약 4/5의 용적을 차지하는 기체이나 동시에 단백질이나 아미노산, 핵산과 같이 생명에 중요한 물질이나 요소, 암모니아, 초산, 이산화질소 등 매우 많은 화합물을 만드는 대응력이 풍부한 원소이며 바다속에서 계속 형을 바꾸면서 생물과 외계사이를 흐르고 있다. 이 흐름이 전체로서 큰 순환형을 취하고 있다. 어느 곳을 출발점으로 생각하여도 같다.

▶ 질소고정균의 작용

박테리아는 질소를 몸에 취입하여 암모니아로 바꾸며 또 다시 이것을 유기물로 변화시킨다. 즉, 공중의 질소고정균이 육상의 흙속에 넓게 서식하는 것은 잘 알려져 있다. 이들 박테리아의 어떤 것은 흙속에서 독립된 생활을 영위하고 또는 콩종류의 식물뿌리나 때로는 줄기에 공생하고 있다. 바다속에도 질소를 고정시키는 박테리아가 있어서 해수나 해저의 퇴적물에 섞여 퍼져서 체내에서 암모니아로부터 아미노산으로 나아가서는 단백질 핵



▲ 바다의 질소의 순환
(굵은선으로 나타낸것은 세균의 작용)

산으로 변한다.

해양표층에 많은 남·조류를 포함한 이와같은 질소고정박테리아에 의해 해마다 고정되고 있는 질소의 양은 약 3천5백만톤에 도달한다고 한다.

이와같이 박테리아의 체내성분이 된 질소는 그림과 같이 바다에서의 질소의 순환을 이루고 있다. 또한 박테리아에 고정된 질소의 일부는 체외로 분비된다. 또한 질소고정박테리아가 죽으면 그 체내의 유기물은 바다속의 별도의 박테리아에 의해 분해되고 질소의 대부분은 암모니아의 형으로 변한다.

나아가서는 질소고정세균은 미소한 동물플랭크톤에 먹이게 되어 이와같이 먹이고 먹는 식물연쇄가 이루어진다. 이와같이 동물들의 체내를 건너가는 사이에 질소의 상당한 부분에 요소나 암모니아의 형으로 이들 동물에서 배설된다. 이들 동물이 죽을 때는 그 체내의 유기물은 박테리아에 의해 분해되고 질소의 대부분은 암모니아로 변한다.

▶ 다시 기체는 질소로

이와같이 바다속에서 여러 경로를 통해 암모니아가 계속 만들어지는 데도 불구하고 해수중의 암모니아의 양은 매우 적으며 실제로 이것은 실험실의 증류수중에 포함된 미량의 암모니아 보다도 적다고 한다.

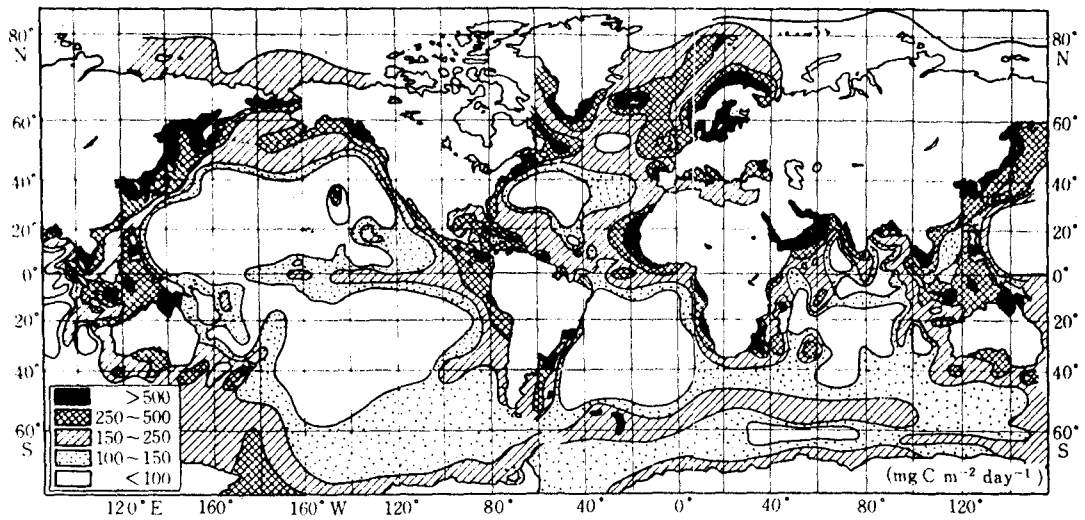
그 이유는 그림에서 보다시피 바다속에서 만들어진 암모니아가 초화박테리아의 작용에 의해 거침없이 계속 초산이 되는 까닭이라 한다.

또한 암모니아의 일부분이나 암모니아에서 초화박테리아에 의해 만들어진 초산(염)은 바닥이 식물플랭크톤에 의해 그 영양염으로 흡수된다. 나아가서는 초산염의 일부분은 바다의 산소가 적은 층이나 해저의 퇴적물중에서 산소를 빼앗겨 다시 기체의 질소로 변한다. 이와같은 과정을 「탈질이라고 부르며 이와같은 작용을 하는 박테리아를 탈질박테리아」라 한다.

바다의 기초생산

지구상에 있어서 거의 대부분의 생산활동은 녹색식물에 의한 태양에너지를 이용한 유기물의 생산에서 시작된다. 이까닭에 녹색식물은 생산자라 부르고 그 유기물의 생산을 「기초생산」 혹은 「1차생산」이라고 부른다. 또한 동물플랭크톤, 고기류는 직접적 혹은 간접적으로 기초생산에 의존하는 소비자라고 부를 수 있다.

인간이 거주하는 육상에서는 밀림, 농경지, 초원, 사막 등 기초생산량은 장소에 따라 대폭적으로 변동한다. 그리고 바다에서 작은 식물플랭크톤이 기초생산의 주역이 되는데 육상과 마찬가지로 그 생산량은 해역에 따라 대폭적으로 변한다.



▲ 세계의 바다의 기초생산(단위는 mg-c/m²/day)

그림에서 보는 세계의 바다에 있어서 기초 생산이 높은 곳이 당연히 양호한 어장이 된다. 바다의 여러곳에서 무엇이 기초생산의 양을 결정하는 것이 될까 알아보기로 한다

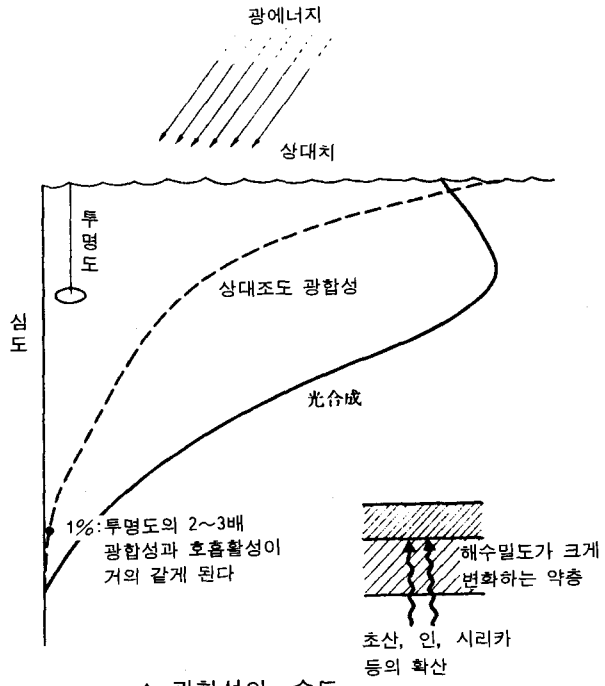
▶ 식물플랭크톤의 생육

「광합성이란 식물이 물과 탄산가스에서 광에너지에 의해 유기물을 만든다」고 정의되고 있다. 바다에서 광합성에 유효한 태양광은 투명도의 2~3배의 곳까지 들어간다. 해역에 따라 상이하지만 가장 투명도가 높은 바다에서 그 길이는 150m정도가 된다.

해수중에는 중탄산이온이 탄소량으로서 28mg/l 존재하고 그 양은 바다전체로 보면 공기중의 탄산가스의 60배에 상당한다. 식물플랭크톤이 활발하게 증식하여도 거의 적은 일부분만 소비할 뿐으로 중탄산이온이 부족한 것은 없다. 따라서 바다의 식물플랭크톤의 생육은 광조건에 따라 제약을 받는다. 바다속의 식물플랭크톤의 생육속도를 방사성탄소 ^{14}C로서 표시하고 중탄산이온을 사용해서 측정하면 상대조도 1% 깊이의 층까지 실질적인 유기물의 생산이 행하여진다.

그래서 빛(光)이 강한 남쪽 바다일수록 기초 생산은 크게 된다.

그런데 세계바다의 기초생산 지도를 보면 오히려 남쪽바다일수록 역으로 기초생산이 낮다. 이것은 식물플랭크톤에 질소, 인, 시리카 등의 영양물질의 공급이 생육의 제한인자가 되고 있는 까닭이다.



▲ 광합성의 속도

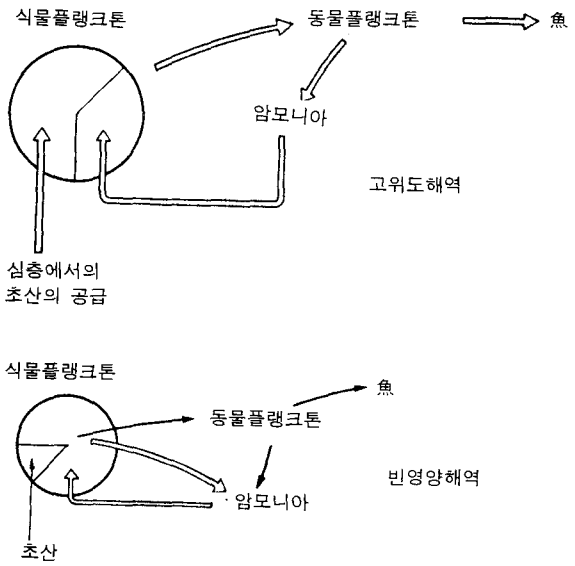
▶ 질소의 공급

영양물질의 공급면에서 광합성이 활발하게 진행되는 유광층의 바다는 3개의 장으로 나누어진다. 여기서는 식물플랭크톤이 가장 부족하기 쉬운 질소의 공급을 예로 들어 취급하고자 한다.

첫째의 장은 겨울철, 표면의 바다물이 충분히 냉각되는 까닭에 해수의 상하혼합이 왕성하게 되는 고위도해역이다.

예컨대 동북해역의 북위 44°에서 관찰하면 이 시기에 유광층에는 논(畓)에 넣는 비료와 거의 같은 양의 초산이 공급된다. 식물플랭크톤은 이 풍부한 초산이나 인을 이용해서 봄에서 여름까지 활발하게 증식한다. 이와같은 해역에서는 식물플랭크톤에 필요한 질소의 80%가 초산으로 잘 처리되고 나머지 20%는 식물플랭크톤을 포식한 동물플랭크톤이 배설하는 암모니아가 이용된다. 이와 같이 유광층 아래에서 공급된 영양물질을 이용한 1차생산을 「신생층」이라 부르고 동물플랭크톤, 고기에 계속되는 식물연쇄의 흐름속에 조입(組入)되어 바다의 보고에 크게 기여한다.

이에 대해 기초생산이 낮은 아열대의 바다는 어떤가. 이 해역에서는 유광층의 수온은 높고 해수는 휘저어 섞은 목욕탕과 같이 성층화한다. 이 까닭에 유광층속에는 질소나 인이 없어지고 또 아래로부터의 공급도 없다. 식물플랭크톤은 유기물의 분해에 대해 공급된 암모니아를 질소원으로 해서 활발하게 증식한다. 하지만 새로운 영양물질의 공급이 없는 까닭에 매우 적은 장소를 NH_4^+ → 생물체 → NH_4^+로 돌게한다. 이와같은 기초생산을 「재생산」



▲ 신생산/재생산

「광합성이란
식물이 물과 탄산가스에서
광에너지에 의해
유기물을 만든다」고
정의되고 있다.
바다에서 광합성에
유효한 태양광은
투명도의 2~3배의
곳까지 들어간다.
해역에 따라 상이하지만
가장 투명도가 높은
바다에서
그 길이는
150m 정도가 된다.

이라고 부르는데 유기물과 암모니아 사이를 질소가 공전할 뿐으로 어류에 계속되는 식물연쇄의 흐름은 매우 작게 된다. 이와같은 해역을 「부영양해역」이라고 부르고 흑조(구로시오)의 동쪽의 넓고 큰 바다가 이에 해당된다.

어떤형으로 부영양해역에 질소가 공급되는 장이 세번째의 바다이다. 생물은 여러가지 능력을 가진 것이 존재한다. 남조도리코데스뮴은 아열대·열대의 바다에서 충분하게 내리쬐는 태양에너지를 전적으로 이용해서 질소고정을 행해서 증식한다.

남중국해나 홍해의 높은 생산에는 이 남조가 크게 기여하고 있다. 광이 충분히 있는 해역에 영양물질이 정상적으로 공급되면 식물플랭크톤에 있어서는 최적의 생육장소가 되고 폭발적인 증식을 가능하게 한다. 이와같은 장소의 대표적인 것은 "멕시코·페루" 먼 바다나 "아프리카"서해안에서 기초생산이 높게 나온다.

전자의 해역에서는 용승(湧昇)에 의한 영양물질의 공급이 "안초비"의 대량어획의 기본이 되고 있다. 흑조나 멕시코만류와 같은 거대한 바다속의 흐름에 의해 도서의 주변이나 국지적인 장소에서 용승이 발생해서 기초생산을 높인다고 알려져있다. 그림에서 태평양에는 넓고 큰 부영양해역이 존재하고 있음을 볼 수 있다. 태양에너지는 충분하나 200m 심층에는 풍부한 초산, 인, 시리카가 저장되고 있다. 앞으로 심층의 물을 해수면으로 퍼올릴 수만 있다면 장대한 해양목장의 꿈이 먼 장래에 실현될 것이다.