

해양미생물 - 다양성과 산업적 가치¹⁾

홍 순 규²⁾

한국해양연구원 부설 극지연구소

바다하면 우선 떠오르는 것은 우리가 식탁에서 만날 수 있는 고등어, 갈치, 참치 등의 생선과 미역, 다시마, 김 등의 해조류들일 것이다. 그리고 높은 파도와 태풍 그리고 쓰나미는 생명을 앗아가고 많은 재산피해를 일으키는 등 인간이 감당할 수 없는 피해를 끼치기도 한다. 삼면이 바다에 둘러싸여 있고 특히 남해와 서해가 대륙붕을 형성하고 있는 우리나라에서는 온갖 조개와 갯지렁이, 게가 살고 있는 갯벌도 중요한 기억 중의 하나를 형성하고 있을 것이다. 해저 2만리, 노인과 바다, 아틀란티스 등 바다는 인간에게 있어서 무한한 상상력과 도전을 불러 일으키는 대상이기도 하다. 바다는 지구 표면적의 사분의 삼을 차지하고 있는 광대한 영역이며 최고의 깊이는 11 km에 달하는 미개척의 영역이기도 하다. 이렇게 바다는 인간들 특히 바다와 접해 있는 국토에 살고 있는 우리나라 사람들에게는 많은 영향을 미치고 있으며 다양한 생물이 살고 있는 터전이기도 하다. 이 글에서는 바다생물 그 중에서도 눈에 보이지 않기 때문에 많은 관심을 받지 못했던 해양미생물의 다양성과 미래 산업에서의 가치에 대해서 논하고자 한다.

미생물이란 무엇인가?

미생물이란 어떤 생물을 말하는 것일까? 미생물을 정의하는 것은 생각보다 쉽지 않은 일이다. 말 그대로 해석하자면 미생물은 작은 생물이다. 특히 우리가 맨눈으로 볼 수 없고 현미경을 사용해야만 볼 수 있는 작은 생물을 흔히 미생물이라고 부른다. 미생물은 17세기 루벤후크에 의해서 현미경이 발명되면서 인류에게 인지되기 시작했다. 그 이전에 인간이 인식할 수 있었던 생물들은 동물과 식물로 나뉘어 있었다. 돌아다닐 수 있고 다른 생물을 먹으면서 살아가는 생물은 동물이며 한자리에 머무르며 광합성을 이용해서 스스로 필요한 영양분을 만들어 내는 생물은 식물이라고 인식되었다. 그렇다면 버섯은 동물일까 식물일까? 돌아다니지 못한다는 점에서는 식물이라고 볼 수 있고 광합성을 하지 못한다는 점에서는 동물을 닮았다. 그렇다면 오랫동안 인간과 함께하면서 술과 빵을 만드는 데 중요한 역할을 하고 있는 효모는 어디에 포함될까? 이 질문에 대해서는 누구나 주저하지 않고 미생물이라고 부를 것이다. 효모는 일반적으로 10마이크로미터 이하의 크기를 가지고 있으며 현미경이 없이

1) Marine Microorganisms - Diversity and Potential

2) HONG, Soon Gyu, Korea Polar Research Institute, KORDI, E-mail: polypore@kopri.re.kr

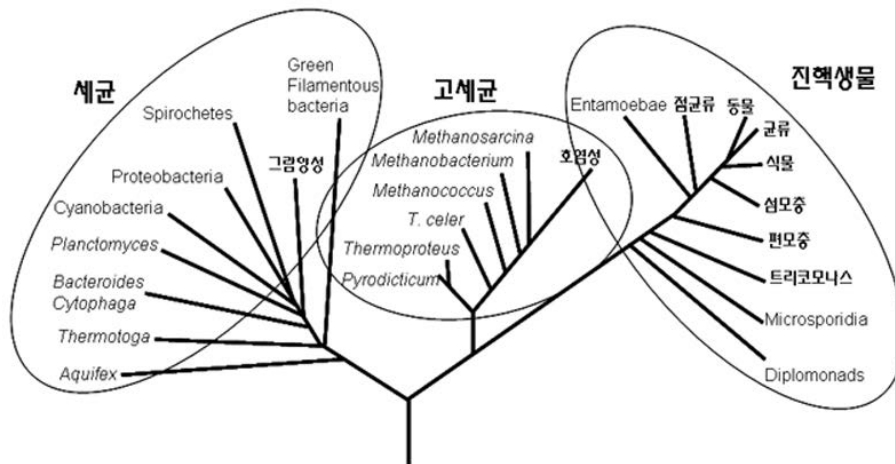
는 보이지 않는 작은 생물 그야말로 미생물이다. 그런데 효모와 버섯이 아주 가까운 친척이라면 혼동이 오기 시작할 것이다. 더군다나 현재까지 지구상에서 발견된 생물들 중 가장 거대한 생물이 균사로 이루어진 균류라면? 균류는 앞에서 이야기한 버섯, 효모를 비롯하여 페니실린을 생산하는 페니실리움 곰팡이, 아플라톡신을 생산하여 치명적인 독성을 나타내는 아스페르길루스 곰팡이등의 곰팡이를 포함하는 생물들로서 전통적으로는 식물로 다루어져 왔으나 현대에는 대부분 미생물의 범주에 포함시켜서 다루어지고 있다.

또하나 혼동스러운 생물이 조류(algae)이다. 바닷가 바위에 붙어서 살고 있는 초록색, 갈색, 붉은색의 생물들을 흔히 볼 수 있는데 이들이 조류이다. 우리의 식탁에서 만날 수 있는 미역, 다시마, 김, 툇 등이 조류이며 바다에서 주로 자라기 때문에 해조류라고 부른다. 연못에서 볼 수 있는 말 종류는 담수 조류라고 불린다. 그런데 조류 중에서 맨눈으로 볼 수 없는 종류가 있는데 여름철이 되면 뉴스를 장식하고 양식장 물고기의 폐죽음을 가져오는 적조와 연못이나 댐의 물 색깔을 온통 둔탁한 초록색으로 만드는 녹조

가 그들이다. 이들 조류들은 미역이나 다시마와 달리 눈으로 볼 수 없기 때문에 미세조류라고 불린다. 미세조류는 흔히 식물학 분야에서 연구되지만 많은 경우에 미생물로 다루어진다.

현미경에 의해서 처음 관찰되었을 때 미세조류와는 아주 다른 생물로 다루어져 왔지만 현대 생물학에서는 다른 어떤 생물보다도 가까운 친척으로 다루어지는 원생동물 중에서도 매우 작은 크기를 가지는 미생물이 많이 존재한다. 지금까지 이야기한 균류, 미세조류, 원생동물(protozoa) 등의 미생물들은 모두 한가지의 공통점을 가지고 있는데 동물, 식물과 마찬가지로 핵을 가지고 있다는 점이다. 핵을 가지는 생물들은 진핵생물이라고 불리는데 이중에서 동물과 균류가 가장 가까운 친척이고 식물이 이들과 사촌관계를 맺고 있다. 진핵생물의 진화에 있어서 동물, 식물, 균류가 탄생하기 이전에 존재했던 조상으로부터 먼저 분화된 생물들이 조류와 원생동물이며 이들은 유전적으로 매우 높은 다양성을 가지고 있다.

핵을 가지고 있는 진핵생물이 있다면 핵이 없는 생물 즉 원핵생물도 존재한다. 분자계통학이 발전하기 이전인 1960년대까지는



지구상에 존재하는 생물은 크게 동물, 식물, 균류, 원생생물(protoists), 그리고 monera라고 불린 원핵생물 등 5개의 계(kingdom)로 나누어져 있었다. 1970년대와 80년대를 거치면서 생물분자가 가지고 있는 정보를 이용한 계통학 즉 분자계통학이 발달하면서 원핵생물은 하나의 분류군에 속하지 않고 크게 두 개의 완전히 다른 분류군으로 나뉘어진다는 것이 밝혀지면서 이들은 세균(bacteria)과 고세균(archaea)으로 나뉘어졌다. 이들 두 분류군은 크기가 매우 작은 대표적인 미생물이라고 할 수 있다. 고세균은 염분의 농도가 매우 높은 지역에 사는 호염성균, 온도가 매우 높은 지역에 사는 호열성균 등 지구 초기 환경과 유사한 환경에 적응되어 있는 것으로 보아 초기지구역사에 등장했던 생물이란 짐작하에 고세균이라고 불리어졌다. 그러나 현재는 이러한 관점은 더 이상 유효하지 않은 것으로 일반적으로 생각되며 초기 지구에 나타난 생물은 크게 세균, 고세균, 진핵생물로 나뉘어 진화했으며 이들이 번창하여 지구상에 존재하는 매우 다양한 생물이 만들어졌을 것이라고 생각되고 있다.

해양미생물의 다양성

모든 생물은 자신이 가지고 있는 특성과 능력에 따라 적합한 환경에 적응해서 살아가고 있다. 생물 중에는 주변의 환경을 변화시키며 매우 다양한 환경에 적응해서 살고 있는 인간과 같은 생물도 존재하지만 높은 염도가 유지되는 환경에서만 생존할 수 있는 호염성 세균이나 특정한 숙주에서만 살아가는 세균같이 아주 특이적인 환경에서만 살 수 있는 생물들도 존재한다. 특이환경마다 그곳에 적응한 생물이 있다면 환경의 종류만큼이나 다양한 생물들이 바다속에 존재하고 있을 것이다.

바다에서 가장 대표적인 환경은 역시 바닷물일 것이다. 바닷물은 지구 생물이 잉태된 곳이라고 생각되고 있으며 현재도 매우 다양한 생물이 살고 있는 고향이다. 육상에 존재하는 많은 생물도 바다에서 육상으로 이동하면서 진화한 것이라고 생각되고 있다. 그렇다면 바닷물에는 얼마나 다양한 생물이 살고 있을까? 특정환경에 존재하는 미생물의 다양성을 알기 위해서 다양한 방법을 사용할 수 있는데 가장 먼저 사용되었던 방법은 배양된 미생물을 동정해서 미생물의 다양성을 확인하는 방법이었다. 이러한 방법을 통해서 현재까지 확인된 세균 종은 약 8,000에 이른다. 이 숫자는 바다 환경에 국한되지 않고 지구상의 모든 환경에서 분리된 미생물의 숫자이다. 이 숫자를 지구에 존재하는 또는 이중 일부를 바다에 존재하는 미생물의 다양성을 나타낸다고 믿기에는 많은 문제점이 있다. 우선 현재까지 인간이 배양할 수 있는 미생물은 환경에 존재하는 미생물 중 극히 일부에 지나지 않는다는 점이다. 바닷물의 경우 1% 이하의 미생물만 배양할 수 있다고 알려져 있으며 현재도 많은 신종미생물이 보고되고 있으므로 실제로 존재하는 미생물의 종류는 배양된 미생물의 100배 이상이라고 생각할 수 있을 것이다. 미생물의 종 다양성에 대한 예측에 많은 영향을 미치는 요인 중 하나는 미생물의 종정의이다. 세균의 경우 DNA-DNA 재구성 비율이 70% 이하인 경우에 서로 다른 종으로 인정되고 있다. 이 기준은 16S 리보솜 RNA 염기서열이 97% 이하에 해당하는 값이다. 이러한 기준은 교배 가능성으로 종을 구분하는 동물의 경우와 달리 유성생식이 없어 분류학자들간의 합의에 의해서 만들어진 기준으로서 동물과 식물에 비해서 매우 광범위하게 정의되어 있어서 세균과 고세균의 다양성을 낮게 측정하게 하는 원인 중의 하나이다. 이로

인해서 서로 다른 환경에 적응되어 있으며 매우 다른 특성을 나타내는 미생물이 같은 종으로 다루어지는 경우가 매우 많다. 따라서 동물이나 식물과 같은 수준으로 종을 구분한다면 미생물 종은 현재에 비해서 수백 배 이상이 될 것으로 예상된다.

최근에 들어와서 미생물 배양 방법의 한계를 극복하기 위하여 환경으로부터 직접 DNA를 추출하고 PCR을 이용하여 16S rRNA 유전자를 증폭해서 이를 분석하는 방법이 미생물 다양성을 연구하는 중요한 방법으로 대두되었다. 이 연구방법을 이용한 초기 연구에서는 과도한 염기서열 분석비용으로 인하여 수십 내지 수백개의 클론에 대하여 염기서열을 분석하였으며 이 정도의 분석으로는 해양미생물의 다양성을 모두 분석하는 것이 불가능하다는 결론에 다다르게 되었다. 최근에는 수천개의 클론에 대하여 염기서열을 분석함으로써 미생물다양성을 밝히고자 하였으나 이 역시 전체 미생물의 다양성을 밝히기에는 부족하다는 결론을 얻게 되었다. 그러나 이러한 연구결과로부터 이전까지 배양에 의해서 밝혀지지 않았던 다양한 미생물의 존재가 밝혀지게 되었는데 이는 현재 알려져 있는 세균 강(division)이 26개인데 반하여 염기서열에 의해서만 정의된 후보강이 54개에 달한다는 사실로부터 환경으로부터 직접 염기서열을 분석함으로써 얻을 수 있었던 미생물 다양성에 대한 정보가 얼마나 큰가를 짐작하게 해준다. 최근에는 새롭게 개발된 pyro-sequencing 방법을 이용하여 10,000개 이상의 염기서열을 분석하여 미생물다양성을 분석하고 있는데 이 또한 미생물다양성을 다 밝히기엔 역부족이라는 사실이 드러남으로써 해양에 존재하는 미생물 다양성이 얼마나 큰가에 대하여 여전히 풀리지 않는 숙제를 안겨 주고 있다.

미생물의 다양성을 연구하는 방법에는 위

에서 소개한 것처럼 지표유전자를 이용해서 종다양성을 연구하는 방법외에 유전체의 다양성을 연구하는 방법이 있다. 인간의 유전체를 분석하는데 있어서 샷건(shot-gun)이라는 새로운 방법을 도입해서 매우 빠른 시간에 염기서열 지도를 완성하였던 크레이그 벤터 박사 연구팀은 2004년 Sorcerer II Global Ocean Sampling(GOS) Expedition을 통하여 바닷물에 존재하는 미생물 메타게놈을 분석하는 연구를 수행하였다. 벤터 박사 연구팀은 북대서양에서 출발하여 파나마운하를 거치고 남태평양에 이르는 8,000 km의 거리에서 41개의 표층수 시료를 필터를 이용하여 농축하고 이로부터 샷건 염기서열 결정법을 이용하여 환경으로부터 수집한 메타게놈 전체에 대하여 염기서열 분석을 시도하였다. 이로부터 770만 염기서열(63억 베이스 페어)을 얻었다. 이들 염기서열을 분석한 결과 상상할 수 없을 정도의 염기서열 다양성이 존재한다는 것을 알 수 있었는데 98%의 동일성 기준으로 보았을 때 어셈블된 염기서열의 85%가 다른 염기서열과는 다른 고유의 염기서열을 가지고 있는 것으로 나타났다. 확보된 염기서열로부터 단백질 코딩영역을 예측하고 단백질 서열을 분석한 결과 전체 612만개의 단백질 서열 중 1,700개의 단백질이 현재까지 모든 종류의 생물에서 밝혀진 어떤 단백질과도 상동성을 가지지 않는 새로운 단백질인 것으로 나타났다. 이 결과로부터 해양의 새로운 생물에 대한 정보가 축적되어 갈수록 새로운 생물종에 대한 정보뿐 아니라 새로운 유전자에 대한 정보도 축적되어 갈 것이라는 것을 예측할 수 있다.

미생물은 매우 다양한 환경에 적응해서 살아가고 있으며 각각의 환경 특성에 따라 미생물의 종류와 이들 미생물이 보유하고 있는 유전자와 기능에 있어서 다양성을 가지고 있다. 빛이 다량 도달하여 일차생산이 활

발하게 이루어지는 표층수, 빛이 도달하지 않으며 매우 높은 압력을 유지하고 있는 해양심층수, 바닷속 화산활동이 일어나고 있는 해저열수구, 광주기가 여름과 겨울이 극명하게 구별되며 매우 낮은 온도를 유지하는 극지역의 해수, 해수와 토양이 접하고 있어 무기물 및 다양한 영양성분에서 다양성을 보여주는 갯벌 및 해양퇴적토, 해양동물 및 해조류의 내부 또는 밀접한 연관을 가지고 있는 외부환경에 서식하는 미생물은 각 환경에서 살아가는 전략이 다른 만큼 이들이 생산하는 물질의 종류와 유전자도 매우 다양할 것으로 예측된다. 표층수에서 주로 이루어진 미생물다양성 연구와 메타게놈 연구결과로부터 유추해볼 때 전체 해양환경에 존재하는 미생물 및 유전적 다양성은 현재로서는 예측할 수도 없을 만큼 클 것이라 결론지을 수 있을 것이다.

해양미생물의 산업가치

인간이 미생물을 이용한 것은 의도적이었던 의도적이지 않았든 매우 오랜 역사를 가지고 있다. 바쿠스신의 선물인 술은 효모에 의해서 만들어지고 요구르트는 유산균에 의해서 만들어진다. 한국인의 식생활에서 빼놓을 수 없는 김치, 간장, 된장, 고추장 등이 모두 세균과 곰팡이의 복합적인 작용에 의해서 만들어지는 발효 식품이다. 2차 세계대전에서 군인들의 목숨을 건진 일등공신은 곰팡이가 만들어내는 페니실린이며, 스트렙토마이신, 네오마이신, 카나마이신 등 각종 항생제들은 곰팡이와 세균에 의해서 만들어지는 화합물이다. 각종 피혁이나 섬유가공에 사용되는 섬유소 분해효소, 당 분해효소, 단백질 분해효소, 세제에 포함되어 있는 지질 분해효소 등도 많은 경우 미생물에 의해서 생산된 물질이다. 이외에도 수없이 많은 미

생물 생산물들이 산업체와 병원에서 사용되고 있으며 슈퍼마켓의 진열대에 전시되어 있다.

해양미생물에 의해서 생산된 물질들은 다양한 산업분야에서 응용되고 있다. 예로는 호염성 해양미생물을 이용한 항생제 이스타마이신, 내한성 미생물을 이용한 세제용 효소, 빙핵활성 단백질, 내한성 유전자를 이용한 알파 인터페론의 안정화, 다양한 바이오 폴리머 등을 들 수 있다. 최근에는 남태평양의 심해 열수구에서 분리된 미생물인 *Thermococcus onnurineus*에서 유전체 정보를 해독하고 이로부터 호열성 DNA 중합효소를 개발하여 생산하고 있다.

해양미생물의 산업적 이용분야에서 많은 연구가 이루어진 분야는 해양공생미생물에 관한 것이다. 해면, 산호, 군체멍게 등의 해양저서생물로부터 스테롤, 알칼로이드, 테르페노이드, 할로겐화합물 등 여러 가지 구조의 다양한 화학성분이 분리되었으며, 이러한 물질들은 항생, 항진균, 항바이러스, 항암활성 등 다양한 생리활성을 가지고 있다. 이러한 물질들이 공생하는 미생물에 의해서 생산될 것이라는 가설은 해면의 일종인 테다니스 이그니스의 생리활성 물질이 공생세균인 마이크로코커스에 의해서 생산된다는 사실이 밝혀짐으로서 정설로 받아들여지고 있다. 이러한 결과는 유용물질 탐색의 단계를 넘어서 유용물질의 산업적인 생산을 위해서 매우 유리한 조건을 제공한다. 해양에 서식하는 해면에서 직접 물질을 생산하려고 할 경우 엄청난 회수량으로 인하여 해면은 멸종하고 말 것이다. 이에 반해서 분리 배양된 미생물로부터 물질을 생산할 경우 발효기 내에서 미생물을 배양함으로써 자연을 훼손하지 않고 물질을 생산할 수 있으며 생산량을 늘이는데 문제가 발생하지 않는다. 또한 유전공학적인 조작을 통한 물질 생산능력 향상이 다른 생물에 비해서 쉬워서 시장경쟁

력이 있는 제품의 생산에도 유리할 것이다.

국내에서도 해양미생물의 중요성에 대한 공감대가 형성되어 있으며 이에 대한 투자가 이루어지고 있다. 한국해양연구원, 서울대학교, 부경대학교 등이 주축이 되어 머틴 바이오 사업을 수행하고 있으며, 이 연구로부터 해양생물자원의 체계적인 확보와 관리, 이로부터 생물신소재를 개발하려는 노력을 기울이고 있다. 또한 극지연구소에서는 극지 바이오 사업의 일환으로 극지해양으로부터 다양한 미생물을 확보하고 이로부터 내한성 효소를 검출하여 세제산업, 화학공정 대체, 의료용 물질생산 등에 응용하려는 연구를 수행하고 있다. 특히 극지해양에서 배양된 미생물 중 15% 이상이 신종미생물로서 아직 탐색되지 않은 미생물 종다양성, 기능성 물질의 다양성 및 극지해양 미생물의 산업적 이용에 대한 잠재능력을 짐작케 해 준다.

산업혁명 이후 인간활동이 극대화되면서 발생한 지구온난화 문제는 전 인류가 공동 대응해야 할 매우 심각한 문제 중 하나이다. 온난화로 인한 해수면 상승으로 인하여 섬과 해안 도시들이 물에 잠기고 있고, 해수순환의 변화로 인하여 지구 곳곳에서 이상기후가 발생하고 있다. 또한 해수온도 변화로 인하여 어족자원의 분포와 이동이 예전과 달라져 어업에도 많은 영향을 미치고 있다. 지구온난화로 인해서 발생하는 여러 가지 문제에 대처하기 위하여 온실가스 감축을 골자로 한 교토의정서가 2005년에 발효되어 세계 각국이 이에 대처하기 위하여 노력하고 있다. 선진국을 중심으로 각 나라마다 온실가스 배출 감소 목표량이 정해져 있으며, 이를 잘 수행한 국가와 그렇지 않은 국가간에 탄소배출권 거래 시장도 활성화되어 새로운 산업분야로 자리 잡아 가고 있다. 우리나라의 경우 교토의정서에서는 개발도상국 지위로 의무적인 감축 대상국가에서 제외되

었지만 경제규모와 탄소배출량을 고려했을 때 조만간 온실가스 배출규제를 받게 될 것으로 예상된다. 온실가스 배출을 줄이는 방법에는 화석연료 사용을 줄이는 방법과 공기중의 이산화탄소를 포집하여 배출된 온실가스를 감소시키는 방법이 있다. 지구표면적의 사분의 삼 이상을 차지하고 있는 해양은 많은 광합성 미생물이 살아가는 공간이다. 대표적으로는 많은 미세조류가 해양의 일차생산자로서 햇빛을 이용하여 바닷물에 녹아 있는 이산화탄소를 동화하여 다른 생물의 먹이가 되기도 하고 바닷속으로 가라 앉을 경우 공기중의 탄소를 제거하는 기능을 하게 될 것이다. 현재 우리나라에서는 해조류를 이용해서 이산화탄소를 제거하는 연구를 수행하고 있는데 미세조류를 이용한 이산화탄소 제거에 대해서도 심각하게 고려해 볼 수 있을 것으로 생각된다.

맺음말

바다는 인간과 밀접과 연관을 가지고 있으면서도 여전히 모르는 부분이 훨씬 많은 미지의 세계이다. 그 중에서도 눈에 보이지 않기 때문에, 그리고 현대의 생물학 기술로도 여전히 탐색할 수 없었던 수많은 미생물들이 살아가는 곳이다. 이들 미생물은 가이아 이론에서 제임스 러브록이 말한 것처럼 지구를 태양계의 다른 행성과는 달리 하나의 생명체로 만들어주고 평형을 유지시키는데 매우 중요한 생물이다. 또한 태고적 생물이 탄생하고 진화한 고향으로서 생명의 신비를 담고 있는 곳이기도 하다. 해양미생물이 만들어내는 다양한 물질들은 이미 인간 생활 곳곳에 스며들어 있으며 이들의 다양성을 고려했을 때 무한한 잠재력을 가진 생물이기도 하다. 21세기는 인간활동의 극대화로 인한 기후변화로 인하여 파국으로 치달

을 지, 인간 스스로의 조절능력을 통해서 장기적인 생존이 가능해질 지 판가름 나는 중요한 시기가 될 전망이다. 우리는 이러한 상황속에서 한편으로는 무한한 자원으로서의 미생물을 적절히 이용할 수 있는 기술을 개발하는 것이 필요하며, 또 한편으로는 후손

들에게 어떠한 지구를 남겨줄 지 고민해야 하는 중요한 시기에 살고 있다. 따라서 각 개인의 관심이 모아지고 국가정책으로 현명한 결정이 내려질 때 풍요롭고 살기좋은 국가와 지구를 후손들에게 물려줄 수 있을 것이라고 생각된다.