尖端産業

共生의 增幅으로 蛋白質食糧 生産

朴 茂 榮
〈韓國科學技術院 名譽敎授 · 理博〉

미세조류는 태양이 보낸 밀사인가

지금으로부터 약 5억년전의 지구는 짙은 탄산가스로 된 대기로 둘러싸여 있었다. 물론 바다도 있었다. 몸속에 파란 엽록소를 가진 식물이 태어난 것은 바로 이 시점이었을 것이다.

태양은 쉴새없이 빛을 지구로 보내 식물들을 도와 탄산가스와 물로 포도당을 만들게 하였다. 소위 광합성이라 하여 빛으로 지구에 도달한 태양에너지는 포도당 분자속에 화학에너지의 모양으로 간직된다. 일단 형성된 포도당은 식물체내에서 일부는 전분이나 섬유소를 만들고 다른 일부는 뿌리를 통해 들어온 질소분을 만나 아미노산, 단백질 등을 만들면서 식물은 스스로 살아갈 수가 있다.

식물이 광합성을 할 때 내뿜는 산소가 대기 속에 축적되었을 때 동물이 태어났다. 엽록소가 없는 동물은 광합성을 못하므로 식물이 만든 포도당이나 단백질에 의존하여 살아간다. 그 동물들 가운데 원숭이의 일종이 유달리 지능지수가 높아 다른 생물들을 지배하며 번성해 간다. 이것이 인류의 기원이다.

그러고 보면 인간을 포함한 지구상의 모든 생물은 그 생명을 태양이 보내주는 빛에너지에 의존하고 있는 셈이다. 태양은 이 사실에 흡족해 하면서도 인류가 지구상에 나타나자 한 가지 걱정거리가 생겼다. 유달리 높은 지능지수가 화근이 되어 인간의 수가 앞뒤를 가리지 않고 늘어날 것이다. 그리하여 끝내는 먹이의 증산이 인구의 증가를 따르지 못할 날이 오고야 말 것이 아닌가.

이 딱한 인류의 앞길을 보고만 있을 수 없어 어느날 태양은 광합성 생물 가운데서도 가장 생장이 빠르다고 이름난 미세조류를 불러 귓속말로 타일렀다.…언젠가는 저 방자한 인간들이 고개를 숙이고 너희들에게 협력을 구해 올 것이다. 미워도 같은 지구상에 태어난 동료가 아니냐. 아낌없이 먹이를 제공해 주어라. 너희들만으로 힘이 모자라면 물고기 떼를 찾아 가거라. 탄산가스와 암모니아로 너희들의 생장을 도와 줄 것이다. 미안해 할 것은 없어. 물고기들은 너희들이 광합성을 통해 공급해 주는 신선한 산소를 고마워 할 것이다.…

초만원의 지구

지구의 총면적 5억960만평방킬로미터 가운데 육지가 1억4천890만평방킬로미터이고 나머지가 바다이다. 이러한 육지와 바다에서 생산되는 각종의 바이오매스(biomass)에 의존하여 사람은 생명을 유지하고 있다.

지구의 총 생산력과 그것이 부양할 수 있는 인구의 수에 관해서는 이론이 많고 식생활의 수준에 따라서도 차이가 커서 인도인의 수준으로는 70억인, 미국인의 수준으로는 15억인 정도로 보고 있다. 모두가 미국인 수준으로 먹어야 한다고 우길 수는 없지만 후진국들도 생활에 여유가 생기면 좀더 나은 식품을 요구하게 되므로 양 숫자의 중간치를 택하더라도 지구가 부양할 수 있는 인구는 약 43억인이

다.

그런데 1990년 현재 세계 인구는 이미 53억을 돌파하였고 35년 후인 2025년에는 그것의 2배인 106억으로 될 것이라고 하니 지구는 이미 초만원의 상태에 놓인 것이다. Mellor와 Adams(1984)의 보고에 의하면 1980년 현재 4억5천만명 이상이 굶주리거나 영양실조에 빠져 있다고 한다. 이 숫자는 1980년 당시의 세계 인구 44억의 약 10분의 1에 해당되는 것이다. Hoshiai(1978,1983), Senez(1979) 들은 예측하기를 앞으로 10년이 남지 못한 서기 2000년에 세계의 단백질 수요량은 7,400만톤인데 그 해에 생산될 단백질 양은 5,200만톤밖에 되지 않아 결국 2,200만톤이 부족한 셈이다. 이 부족량을 무엇으로 메꿀수 있을 것인가.

미생물학자들의 꿈

이러한 식량부족은 농축산물의 증산율이 인구의 증가율을 따라잡지 못함을 증명하는 것이다. 그렇다면 종래의 식량생산 방법보다 훨씬 빠른 무슨 방법이 있어야 될 것이 아닌가.

1940년대에 독일의 미생물학자들이 미세조류(microalgae)를 대량배양하여 식량으로 삼을 궁리를 하였다. 미세조류란 탄산가스, 물, 무기염류를 먹이로 광합성(Photosynthesis)을 통해 자라는 미생물이다. 미세조류는 건조중량의 절반 이상이 단백질로 되어 있을 뿐 아니라 지방질, 탄수화물, 비타민 기타 각종의 생리활성 물질들을 포함하고 있어 장래의 식량원, 에너지원, fine chemicals원으로 크게 각광을 받고 있다. 지구상에 약 25,000종의 미세조류가 서식하고 있다고 보고되었다.

1951년에 들어서 미국의 Arther D.Little사가 New York의 Carnegie Corporation의 연구비로 Chlorella를 실험실 규모와 pilot plant 규모로 배양하였다. 또 1953년에는 California 대학이 10,000리터 규모로 배양하였고 1955년부터는 Rockfeller 재단의 후원으로 200만리터의 pilot plant를 지어 2년 동안 가동하였다.

미세조류의 대량배양은 그 후에도 미국, 일본, 대만, 이스라엘, 프랑스, 이태리, 멕시코, 페루, 태국, 불가리아, 체코슬로바키아, 소련, 독일, 인도, 호주 등지에서 계속되었다. 그러나 생산가가 높아 미세조류는 가축의 사료로서는 경제성을 갖지 못했다. 미생물을 식량으로 삼는 길은 그것을 직접 먹는 것보다 사료로서 가축을 길러 동물성 단백질로 바꾸는 길을 택한다. 가축사료는 값이 싸야만 팔리게 된다. 미세조류 생산가의 대부분은 탄산가스(CO_2)가 차지하며, Soeder(1978)에 의하면 건조 미세조류체 1톤을 생산하는데 드는 CO_2의 값이 $2,000이고 그 해에 사료시장에서 대두박 1톤은 $237에 팔렸다.

이런 비싼 CO_2를 가지고도 현재 대규모로 미세조류를 생산하고 있는 회사들이 있지만 그것은 식량문제를 해결하려는 사료가 목적이 아니고 값비싸게 팔리는 베타 카로틴(β-carotene, 비타민 A의 선구물질)이나 건강식품(health food)을 제조하기 위한 것이다.

약 30년전에 프랑스의 미생물학자들이 석유를 먹고 자라는 미생물을 발견하였다. 땅에서 솟아나는 석유는 비교적 염가로 대량공급이 가능한 원료이다. 이 석유를 원료로 한 Candida 효모의 산업적 생산이 즉시 프랑스에서도 시작되었다. SCP시대의 막이 오르게 된 것이다. SCP란 "single cell protein" 즉 "단세포 단백질"로서 "미생물 단백질"이라고 했을 때의 먹는 사람들의 심리적 거부감을 덜기 위해 만든 말이다.

이 석유유래의 SCP가 영양적으로 호평을 받자 세계 각국에서 민간 또는 정부지원으로 SCP 생산사업이 시작되었다. 영국의 석유회사 BP는 1970년에 영국내에 4,000톤/연, 프랑스에 16,000톤/연 규모의 2개 공장을 세워 효모 SCP를 생산하여 Toprina라는 상표로 사료시장에 선보였다. 이태리는 더 적극적으로 SCP 생산에 뛰어들어 100,000톤/연 규모 공장 2개를 1973년에 정부의 지원까지 받아 건설하였다. 이것보다 더 적극적인 것은 영국의 ICI(Imperial Chemical Industries)이다. 11년 동안에 1억불을 들여 50,000~70,000톤/연 규모의 공장을 세워 석유 유도체인 methanol을 원료로 세균 SCP를 생산하고 있다.

그러나 이와 같이 식량문제 해결이라는 커다란 꿈을 가지고 시작한 SCP의 생산은 의외의 복병을 만나 좌절되고 말았다. BP가 건설한 두개의 공장

은 생산을 정지하였고 이태리에 세운 두 공장은 생산을 시작해 보지도 못하고 문을 닫아야만 했다. 경제적인 이유와 석유로 기른 미생물을 가축의 사료로 삼는데에 대한 소비자의 강한 반발이 이런 결과를 가져 왔다. 자유경제 체제의 사료시장에서는 톤당 약 $250의 대두박이 단백질 사료의 가격을 지배하고 있다. 어떤 SCP도 생산가가 이 대두박 가격을 넘어서는 산업생산이 불가능한 것인데 불행히도 석유로 만든 SCP의 값은 모두가 대두박 가격의 두 배가 넘는다. 설사 경제성이 보장된다고 해도 석유는 한번 써버리면 없어지는 것이니 한정된 석유에 늘어나는 세계의 입을 언제까지나 의지할 수는 없는 것이다.

또 하나의 꿈

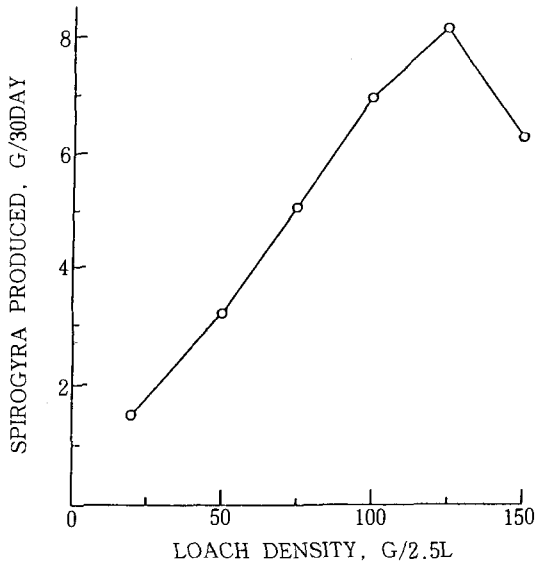
이루지 못한 미생물학자들의 반세기에 걸친 꿈에서 우리는 귀중한 교훈을 얻었다. 미생물 식량을 위한 원료에 대한 윤곽이 뚜렷해진 것이다. 첫째, 값이 싸야 한다. 둘째로 무제한 공급이 되어야 하고 끝으로 안정성이 보장되어야 한다. 이런 조건을 구비한 원료만 발견된다면 미생물학자들의 꿈은 이루어질 것이다.

탄산가스(CO_2)의 값이 비싸서 식량으로서의 미세조류 SCP의 생산이 안된다면 값싼 CO_2를 얻는 방법을 강구하는 수밖에 없다. CO_2는 동물의 호흡에서도 나온다. 물고기도 동물인 이상 물고기가 활동하는 물속에는 CO_2가 존재할 것이다. 역시 물속에서 자라는 미세조류를 이 물고기의 호흡에서 나오는 CO_2로 자라게 할 수만 있다면 값싼 SCP의 생산도 가능해질 것이 아닌가. 지구상에서 물고기가 사라지지 않는 이상 CO_2의 공급이 고갈될 염려가 없고 호흡에서 얻는 CO_2는 석유처럼 발암물질의 개입을 염려할 필요도 없다. 이러한 꿈을 가지고 1987년부터 필자의 연구실에서 미세조류와 물고기의 혼합배양에 관한 연구를 시작하였다.

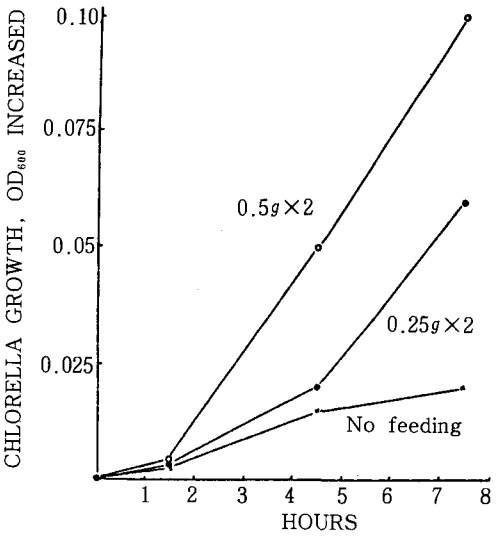
미세조류가 잘 자라는데는 약 5%의 CO_2를 포함한 공기를 불어 넣어주어야 하는데 대기속의 CO_2 함량은 0.03%밖에 되지 않는다. 그런데 같은 물속에 미꾸라지와 Chlorella를 동시에 길러 보았더니 CO_2를 첨가한 공기를 불어 넣어주지 안해도 Chlorella가 잘 자랐다. 확실히 미꾸라지의 호흡 CO_2가 Chlorella에 의해 이용된 것이다. 그뿐 아니라 미꾸라지를 위해서도 통기가 필요 없었다. Chlorella가 광합성할 때 내뿜는 산소(O_2)가 미꾸라지의 호흡에 이용된 것이다. 이 물속의 미세조류와 물고기 사이에는 서로 이익을 주고 받는 공생관계(symbiosis)가 성립된 것이다.

공생의 증폭

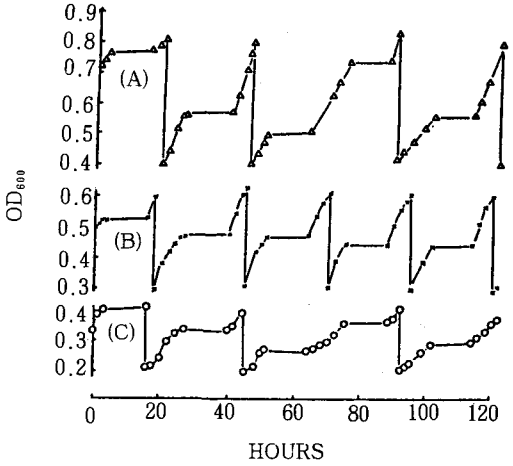
Symbiosis라는 용어는 1879년에 독일의 식물병리학자 A.D.Jaily가 처음 사용한 말이다. 미세조류와 물고기 사이의 공생관계는 호수나 하천 같은 자연수 속에서도 있을 것이다. 그러나 이러한 자연적인 공생관계는 경제적으로 아무런 가치가 없다. 이동성인 물고기는 어느 한곳에 장기적으로 고밀도로 모여 있지 않고 따라서 자연수 속에는 그들의 호흡에 의한 CO_2의 농도도 높지 않을 것이다. CO_2의 농도가 낮으니까 미세조류의 생장도 빠르지 않아 경



〈그림-1〉 Spirogyra 생장에 미치는 미꾸라지 밀도의 영향. Spirogyra sp.를 미꾸라지와 같이 3.0ℓ Erlenmeyer flask 속의 2.5ℓ 물속에 길렀다. 미꾸라지에게는 매일 3회씩 잉어 치어용 배합사료를 급이하였다.



〈그림-2〉 Chlorella 생장에 미치는 미꾸라지 급이의 영향. 2.5ℓ의 물속에 100g의 미꾸라지를 Chlorella sp. 와 같이 기르면서 잉어 치어용 배합사료를 공급하였다.



〈그림-3〉 Chlorella 생장에 미치는 Chlorella 밀도의 영향. 2.5ℓ의 물속에 100g의 미꾸라지를 Chlorella sp. 와 같이 기르면서 수확시기를 달리함으로써 물속의 미세조류 밀도를 조절하였다.

제적인 대량생산을 기대할 수 없을 것이다. 필자는 이런 자연적인 공생관계를 증폭시켜 미세조류의 생장을 빠르게 하는 방법을 개발하였다. 그리하여 이런 공생을 자연공생에 대비하여 증폭공생(amplified symbiosis)이라고 부르기도 했다.

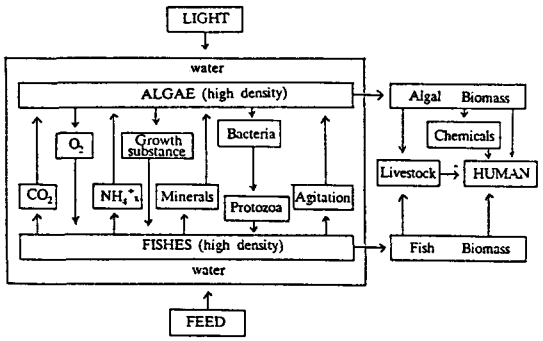
미세조류와 물고기 사이의 공생관계를 증폭시키는 방법에는 3가지가 있다. ① 물고기의 밀도를 올린다. ② 미세조류의 밀도를 올린다. ③ 물고기의 급이율을 증가시킨다. 이 3가지 요소를 생태균형(ecological balance)을 깨지 않는 범위내에서 증가시켜 주면 미세조류와 물고기의 생산율을 동시에 높여 경제적인 생산이 가능하게 된다.

〈그림-1〉은 물고기의 밀도가 미세조류의 생장에 미치는 영향을 본 것이다. Spirogyra의 생장은 미꾸라지의 밀도 증가에 따라 증진되어 2.5ℓ의 물속에 125g의 미꾸라지 즉 1ℓ당 50g의 밀도에서 최고의 성장을 보였다. 미꾸라지의 밀도가 늘어날수록 호흡에 의한 CO_2의 발생량도 늘어나서 더 많은 Spirogyra의 생장을 가져오게 된 것이다. 이와 같이 CO_2의 공급량은 물고기의 밀도를 선택함으로써 임의로 조절되는 것이다.

미세조류의 생장은 물고기의 급이량에도 영향을 받는다. 〈그림-2〉에서와 같이 100g의 미꾸라지에 0.25g의 잉어 치어용 배합사료를 하루에 두번씩 급이했을 때 급이를 하지 않는 것보다 Chlorella의 생장이 현저히 높았다. 급이량을 두배로 늘리면 미세조류의 생장은 더욱 늘어났다. 물고기가 사료를 먹으면 대사작용이 활발해져서 CO_2의 배출량도 늘어난 것이다.

미세조류의 물속에서의 밀도도 조류생산에 영향을 주었다. Chlorella의 수확시기를 배양액 OD_{600}의 값이 0.6에 도달했을 때로 정함으로써 OD_{600} 값으로 표시된 미세조류의 밀도를 0.3에서 0.6 사이에 유지하면 하루에 한번씩 수확이 가능해져(〈그림-3(B)〉) 미세조류의 생산율이 하루에 한번의 수확을 못하는 다른 두 가지(〈그림-3(A), (C)〉)보다 높았다. (A)의 경우는 미세조류 세포에 의한 빛의 차단이 문제되고 (C)의 경우는 지나치게 낮은 inoculum size에 문제가 있는 것이다.

이와 같이 미세조류와 물고기 사이의 공생관계를 증폭시켰을 경우 양 생물이 받는 이점은 CO_2와 O_2의 주고 받는 것 이외에도 여러가지가 있어 이 관계를 〈그림-4〉에 정리해 보았다.



〈그림-4〉 미세조류와 물고기 사이의 공생관계를 나타내는 모식도. 화살표는 이로움의 흐름을 나타낸다. 생산된 fiomass는 여러 모양으로 인간에게 이용된다.

1) 미세조류에게 CO_2를

다음 식은 미세조류가 물속에서 햇빛을 받아 광합성 생장을 할 때의 원료물질과 생산물질 사이의 양적인 관계를 나타내는 것이다.

$$106CO_2+236H_2O+16NH_4^++HPO_4^{2-} \xrightarrow[\text{algae}]{\text{light}} C_{106}H_{181}O_{45}N_{16}P+118O_2+171H_2O+14H^- \quad (\text{biomass})$$

이 화학식에 따르면 미세조류체(biomass) 1톤을 생산하는데 1.92톤의 CO_2가 요구된다. 그것을 가격으로 따지면 $2,000이 된다고 앞에서 언급하였다. 증폭된 공생배양에서는 따로 CO_2를 공급해 주지 않았으므로 이런 양의 CO_2는 모두 물고기의 호흡에서 오는 것이다.

2) 질소원도 공짜로

앞의 화학식에 의하면 미세조류 1톤을 위해 0.12톤의 NH_4^+가 소요된다. 이 질소원도 모두 물고기의 배설을 통해 공급된다. 특히 물고기는 그들이 먹는 단백질 사료속의 질소분의 90% 이상을 NH^+ 형태로 배설하고 이 NH_4^+가 물속에 축적되면 물고기 자신들에게 매우 해로운 것인데 다행히 미세조류는 이 NH_4^+를 흡수하여 자라는데 필요한 질소원으로 삼는다. 따라서 증폭공생이 이루어질 때는 미세조류의 생장을 위한 질소원이 공짜로 공급될 뿐 아니라 제독작용에 힘입어 물고기의 고밀도 양식도 가능하게 되는 것이다.

3) 물고기에게 산소를

미세조류가 광합성을 할 때는 O_2를 방출한다. 앞의 화학식에 따르면 미세조류 1톤이 생산될 때 1.55톤의 O_2가 발생한다. 이 O_2는 물론 물속에 녹아 물고기의 호흡에 이용된다. 그러므로 햇빛이나 인공광으로 증폭공생을 진행시킬 때는 물고기를 위해 따로 통기를 해 줄 필요가 없어져 양어비용의 절감도 기대할 수 있다.

4) 교반작용도 필요 없어

미세조류를 대량으로 배양할 때 물을 쉴새없이 교반하여 물속의 미세조류 세포가 햇빛을 고루 받도록 해주어야 한다. 많은 물을 기계적으로 교반하는 데는 막대한 에너지가 소모되는 데 물고기의 유영운동이 이 기계적인 교반작용을 대신해주므로 교반을 위한 생산비가 절약된다.

5) 원생동물도 막아 주어

햇빛을 받기 위해 미세조류의 대량배양에는 노천배양이 보통이고 노천배양에는 미세조류 이외의 생물들이 혼입해 문제를 일으킨다. 특히 원생동물(Protozoa)에 의한 피해는 심각하다. 다행히 증폭공생생산에서는 물고기가 원생동물을 먹어 없애기 때문에 이런 피해는 걱정 안해도 된다.

6) 토지의 경제적 이용

한 물속에서 미세조류와 물고기를 동시에 생산할 수 있으므로 토지의 경제적인 이용이라는 점에서도 그 의의가 크다. 이것은 우리나라와 같이 국토가 좁은 곳에서 더욱 그러하며 또 지하수만 이용된다면 농경에 부적합한 땅도 식량생산에 이용될 수가 있다.

이상과 같이 증폭된 공생을 통하면 생산비가 대폭적으로 절감되어 사료나 식량을 위한 미세조류 SCP가 경제적으로 생산될 뿐 아니라 어류도 동시에 생산되므로 이 새로운 제조방법에 많은 사람이 관심을 갖고 다같이 연구를 진전시킨다면 앞으로의 식량문제 해결에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.