

기획특집 ③

# 해수중의 무기영양염 제거를 위한 생물여과재로서의 해조류의 이용

부경대학교 양식학과 BK 21 사업단 Post-doc. 황은경

## I. 머릿말

**영**국 북아일랜드의 중심도시인 벨파스트에 위치한 Queen's University of Belfast의 한 단과대학인 School of Biology and Biochemistry는 규모면에서 영국내의 생물과학 분야 단과대학중 상위그룹의 하나이며, 이러한 규모와 시설을 바탕으로 진화생물학, 해산식물의 생리·생태학, 분자생태학 및 군집생태학 등의 연구분야에서 영국뿐 아니라 세계적으로 그 역량을 인정받고 있다. 특히 이 대학에는 다양한 조건대 환경에 손쉽게 접할 수 있는 Portaferry에 해양연구실을 보유하고 있어, 야외실험 및 이와 연계한 생리실험을 수행할 수 있는 제반 여건을 갖추고 있다. 이곳에서의 모든 해조류 관련 연구는 해조류 생태생리학 분야의 세계적 석학인 M. J. Dring 박사를 주축으로 하여, 유럽연합 및 NERC(Natural environment research council)로 부터 연구비를 지원받아 연안수로부터 영양염 및 중금속을 제거하는 연구와 유용 홍조류인 *Palmaria palmata* 양식을 위한 연구 등이 이루어지고 있다. 해양연구실이 위치한 Strangford Arm는 긴 만과 같이 Strangford Lough를 감싸고 있으며 Irish Sea로 열려진 개방형의 지형으로 만의 가장 안쪽에 하수처리공장이 위치하고 있다. 이 지역은 자연환경의 보존을 최우선 과제로 하고 있는 영국과 유럽연합에서 생태계 보존 지역으로 지

정이 되어 있는 만큼, 이 지역의 환경 보존을 위하여 도시 하수를 바다로 방류하기 이전의 2차 처리수로부터 각종 식물을 이용한 영양염 제거에 관한 연구에 심혈을 기울이고 있다.

본 고에서는 저자가 박사후 연구 기간동안 Queen's University의 Marine Lab.에서 수행하였던 연구의 한 부분인, 생물여과재로서 해조류의 이용에 관한 연구의 배경 및 현재까지의 연구 현황을 살펴보고자 한다.

## II. 연구 배경 및 현황

해양의 일차생산자로서 연안에 서식하는 해조류는 생물자원으로서 오랜동안 인간에 이용되어 왔으며, 이미 우리에게 친숙해져 있는 식용으로서의 용도 외에도 의약품, 공업용, 비료용 및 사료용 등으로 광범위하게 이용되어져 왔다. 근래에는 오염수의 정화에 이용되기도 하며, 잠재적인 탄소원으로 또는 메탄가스 생산 등의 대체에너지 생산의 생물자원으로서 주목받고 있다.

해양에서 연안 지역이 차지하는 의미는 유용 수산동물 자원의 산란장과 치어의 생육장으로서의 역할을 수행하며, 육지로부터 유입되는 풍족한 영양염의 공급과 높은 일차생산력으로 인해 수산생물이 서식하기에 좋은 여건을 가지고 있다. 또한 해양의 대부분이 젖은 사막(wet desert)인데 반하

여, 연안역은 높은 생산력을 가지는 중요한 지역이라 할 수 있다. 이러한 연안 해역의 환경 특성에도 불구하고, 연안 해역의 수질은 근래에 들어 악화일로를 걸어왔다. 이는 연안 해양 환경의 급속한 파괴를 초래하여 왔으며, 특히 연안 어업과 수산양식업에 대한 피해를 야기시키고 있다.

따라서 육상으로부터 연안해역으로 유입되는 과도한 질소와 인의 농도를 조절하기 위하여, 세계 각국은 화학적 공정 또는 생물학적 제거 방법을 통한 노력을 기울여 왔으나 이는 화학적 처리 비용과 에너지가 요구되며, 폐화학물질의 처리 문제를 수반한다. 이러한 부영양 해역의 영양염 부하량을 낮추는 방법중 환경친화적인 방법으로써, 최근 생물여과재의 사용에 대한 연구가 시도되어 오고 있다. 현재까지의 연구에 의하면 부영양화가 조류(algae)의 성장을 촉진한다는 것은 명백히 알려져 있으며, 연속 배양체계에서 미세조류(micro algae)가 100%의 질소와 인, 그리고 50~100%의 중금속을 제거하는 결과(Hammouda et al. 1991)가 보고된 바 있다. 그러나 미세조류를 생물여과재로 사용할 경우 외부환경으로 유출될 수 있는 가능성이 있고, 원심분리와 같은 에너지의 소모가 없이는 수확하기 어려운 단점이 있다. 이에 반하여 저서성 해조류(macro algae)는 밀집된 형태의 생체량을 가지며, 야외의 배양에서도 생장이 잘되고, 미세조류에 비하여 수확하기가 쉽다는 장점이 있다.

특히 해조류의 성장에는 많은 영양염을 필요로 하며, 질소와 인같은 영양염 흡수의 과정에서 많은 해조류들은 최대생장에 요구되는 엽체 내부의 영양염 농도를 초과하는 다량의 영양염을 엽체내에 축적하는 능력이 있음이 보고되어 왔다(Kuhl 1974; Lin 1977; Schramm and Booth 1981). 이러한 점에 착안하여 연안 해역에서 부영양화의 억제와 육상으로부터 하천수를 통해 유입되는 다량의 영양염을 조절하기 위하여 해조류를 생물여과재로 사용

할 뿐만 아니라, 생물자원으로서 해조류의 생체량 생산을 얻기 위해 부영양수를 이용한 해조류 양식에 관한 연구가 진행되어 오고 있다.

폐수처리뿐 아니라 부가적인 생체에너지원의 생산을 위한 해조양식의 개념은 Hanisak(1981)에 의해 제안되었으며, 유럽에서는 *Ulva rigida*의 엽체를 사용하여 biogas 생산(Missoni and Mazzagardi 1985)에 이용하는 연구가 행하여 졌다. 또한 만과 같이 폐쇄된 지역에서는 부영양화가 특히 1차생산자의 집적된 발달의 원인이 되므로, 이들을 수확하여 이용함으로써 그 지역에서 초과된 영양염을 제거할 수 있다.

대부분의 가정 오수와 농업 폐수에 다량 함유되어 있는 암모늄을 흡수하는 해조류의 능력은 이미 많은 연구들에서 밝혀져왔다(Yamada 1961; D'Elia and DeBoer 1978; Haines and Wheeler 1978; Wallentinus 1984; DeBusk et al. 1986). 비록 일부의 해조류들은 다른 형태의 반응을 나타내긴 하지만, 암모늄 이온이 존재할때 질산염과 아질산염등의 질소화합물 흡수는 특징적으로 억제되는 등(Prince 1974; Bird 1976; Topinka 1978) 종에 따른 영양염 흡수의 선택성을 보인다.

현재 이용되고 있는 폐수처리 방법은 크게 3가지 방법이 주로 이용되고 있다 ① 인의 화학적 침전 ② 미생물의 탈질화 ③ 수중의 1차생산자를 이용한 인과 질소의 생물학적 제거가 그것이다. 비록 폐수 처리를 통한 영양염의 재사용 또는 결과적으로 생체량의 수확을 위하여 담수산 식물, 단세포조류 또는 다세포 조류의 이용에 관한 많은 문헌들이 있지만 이러한 목적을 위한 해산식물의 사용에 관한 자료는 상대적으로 매우 적은 실정이다.

폐수처리(wastewater treatment)와 영양염의 재사용을 위한 해조류의 종별 감수성은 다음과 같은 종에 따른 생태생리학적, 생물학적, 화학적 특성과 요구에 크게 좌우될 수 있다. ① 특정 영양염을 이

용하는 능력과 그 영양염의 농도에 견디는 능력, wastewater의 가능한 유해성에 견디는 능력 뿐 아니라 영양염과 결합하여 흡수하는 능력 ② 폐수처리 체계에서 일어날 수 있는 다양한 환경조건(극심한 온도, 광, 염분의 조건 등)에 견디고 반응하는 능력, ③ 주기적인 생식과 영양생장반응 ④ 생체량 생산의 잠재력 ⑤ 비료 또는 사료등으로서 생체량의 이용성 또는 특정 화합물 및 bioenergy 소재로의 이용성 ⑥ 폐수로부터 유독 물질에의 오염 가능성에 대한 면밀한 관찰이 요구된다(Schramm 1991).

이러한 우려의 주장에도 불구하고 조건대에 서식하는 해조류의 특성을 적용하여 영양염 재사용에 이용하고자 한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 유럽에서는 기수 지역의 해조를 사용하여 해양 복합양식 체계를 실험하였다(Lehnberg and Schramm 1984; Schramm and Lehnberg 1984, 1985). 이 실험에서 모두 9종의 해조류가 실험되었으며 이들중 녹조류 *Enteromorpha prolifera*, *E. linza*, *E. intestinalis*, *Percursaria percursa*, *Monostroma grevillei*가 낮은 salinity조건에도 적응을 보여 이용 가능성을 보였다. 또한 Rueter and Robinson(1986)은 *Fucus distichus*의 질산염 흡수가 낮은 염분도 조건에서 오히려 증가함을 보인 바 있으며, Dring(1982)은 다시마류의 해조류가 해수중의 질소 농도보다 최대 28,000배나 많은 양의 질소를 염체중에 저장할 수 있음을 보고한 바 있다.

양식과 연관된 해조류를 이용한 영양염의 재사용이라는 상기의 원래 목표는 인공 용승지역인 미국 Virgin Islands의 St. Croix에서 소규모 실험으로 수행되었다(Haines 1976; Langton et al. 1977). 밀도가 다른 4개의 이매패류 *Tapes japonica* 수용수조로부터 유출수를 이용하여 홍조류 *Hypnea musciformis*에 의해 영양염 제거를 실험한 결과 질소농도  $4 \mu\text{mol ammonia nitrogen dm}^{-3}$  이상에

서 최대 70%의 질소가 제거되었다. 또한 Harlin et al.(1979)는 해조류 *Ulva lactuca*, *Gracilaria* sp.를 이용하여 폐쇄된 어류 사육수조에서 잉여 영양염을 제거하고 동시에 해조류의 유용 생체량 생산을 실험하였다. 폐쇄 순환식  $60\text{dm}^3$  수조에 각각 250g의 어류(*Fundulus heteroclitus*)와 해조류를 넣은 실험에서 *Ulva*는  $15^\circ\text{C}$ 에서 62.4%,  $20^\circ\text{C}$ 에서 32%, *Gracilaria*는 각각 83.3%와 112%의 질소를 각각 제거하였다.

또한 염소처리된 2차 도시하수 유출수를 이용하여 *Tilapia* 배양수조의 식물성 플랑크톤과 *Enteromorpha* sp.에 의한 영양염 재활용에 대하여 연구되었으며(Turner et al. 1986), 노르웨이에서 Indergaard and Jensen(1983)은 부영양화된 어류 양식장에서 갈조류 *Laminaria saccharina*, *L. digitata*, *Alaria esculenta*의 양식을 시도하였다. 이에대한 예비실험은 필리핀에서 수행되었으며, 연체동물, 성게 및 해삼과 *Eucheuma*, *Gracilaria*의 복합양식을 통해 영양염 재순환을 목적으로 실현성 있는 결과를 보였다. 또한 Yarish and Chopin(1999)는 연어와 김의 혼합양식을 통하여 자연에서의 빈 영양 시기에 연어 양식장에서 방출된 영양염을 해조류에 공급할 뿐만 아니라, 과도한 영양염을 효과적으로 제거하기 위하여 적정 김 양식 시설량을 환산하였다. 그리고 Houvenaghel and Mathot(1983)는 도시 폐수와 농업폐수중 액체동물 분뇨 같은 비료를 사용해서 프랑스의 Brittany 해안에서 야외 양식 실험으로서 녹조류 *Ulva lactuca*를 양식하였다. 외국의 경우 가정에서 배출되는 하수보다 도시의 2차 폐수와 양식장 유출수가 보다 잘 처리되거나 이용되고 있는데, 단기간 대사율에 대한 연구와 장기간의 양식실험에서 Kindig and Littler(1980)는 처리되지 않은 1차 및 2차 폐수 그리고 염소처리된 2차 폐수 유출수가 미국 남부 캘리포니아의 산호

조류에 미치는 영향을 실험한 바 있다.

### Ⅲ. 맺음말

이상과 같이 세계 각국은 육상으로부터 연안역으로 유입되는 영양염의 부하량을 조절하고 나아가 이를 해조류 생체량 생산을 위하여 재사용하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있으나 현재까지 국내에서는 이에 대한 연구가 전무한 실정으로 이 분야에 대한 연구의 필요성은 절실하다. 또한 현재 과잉생산으로 인하여 한계점에 도달해 있는 국내 양식 해조류 생산물량의 소비를 위한 이용 다변화를 위하여 1차 생산자인 해조류의 특성을 기초로 한 영양염 제거능을 조사함으로써 환경 조절과 생산을 병행할 수 있는 방안을 제시하는 데 있어서도 필수적으로 수행되어야만 하는 연구라 할 수 있다.

그러므로 이러한 환경친화적인 해조류의 양식 즉 영양염의 부하량을 조절하고 이를 통한 해조류의 생체량을 수확하기 위하여는 다양한 해조류의 종별 영양염 흡수율과 영양염 흡수에 영향을 미치는 환경조건을 구명하여야 하며, 변화하는 영양염 공급 조건하에서 해조류의 영양염 제거율 및 성장 주기의 계절적 변화를 측정할 필요가 있다. 이러한 접근은 육상 수조 배양이나 연안의 해역에서도 이루어질 수 있다. 육상 수조 배양을 통한 해조류의 생물여과재로서의 이용은 해조류 자체가 조건대에 서식하는 특성으로 인하여 해수와 담수의 적정 공급비율을 맞추어 주므로써 적정 염분도 범위 조건하에서 혼합수가 해조류 수용 수조를 통과하는 동안에 영양염의 제거가 이루어지며 동시에 해조류 생체량의 생산을 꾀할 수 있다. 또한 해상의 가두리 양식장 주위에 해조류 양식 시설을 병행함으로써 동물의 배설물이나 사료 등으로 부터 야기되는 과도한 영양염을 해조류가 흡수하도록 하여 bioremediation의 효과를 극대화 시킬 수 있다. 이

러한 환경친화적인 해조류 양식을 위하여는 대상 해조류의 생물학, 생태학 및 생리학적 연구의 기초 지식들이 종합되어야만 가능하며, 이에 대한 젊은 연구자들의 끊임없는 도전이 기대된다.

### 참 고 문 헌

- Bird K.T. 1976. Simultaneous assimilation of ammonium and nitrate by *Gelidium nudifrons*(Gelidiales, Rhodophyta). J. Phycol., 12: 238-241.
- DeBusk T.A., M. Blakeslee and J.H. Ryther. 1986. Studies on the outdoor cultivation of *Ulva lactuca* L. Bot. Mar., 29: 381-386.
- D'Elia C.F. and J.A. DeBoer. 1978. Nutritional studies of two red algae. II. Kinetics of ammonium and nitrate uptake. J. Phycol., 14: 266-272.
- Dring M.J. 1982. The biology of marine plants. Edward Arnold(Publishers) Limited, London 199p.
- Haines K.D. 1976. Growth of the carrageenan-producing tropical red seaweed *Hypnea musciformis* in surface water, 870m deep water, effluent from a clam mariculture system and in deep water enriched with artificial fertilizers or domestic sewage. In Proc. 10th Eur. Mar. Biol. Symp., Ostend(eds. G. Persoone and E. Jaspers). pp. 207-220. Wettern University press.
- Haines K.C. and P.A. Wheeler. 1978. Ammonium and nitrate uptake by the marine macrophytes *Hypnea musciformis*(Rhodophyta) and *Macrocystis pyrifera*(Phaeophyta). J. Phycol., 14: 319-324.
- Hammouda O., A. Gaber and N. Abdelraouf. 1991. Microalgae and waste-water treatment. Ecotoxicol. Environ. Safety, 31: 205-210.
- Hanisak M.D. 1981. Recycling the residues from anaerobic digesters as a nutrient source for seaweed growth. Bot. Mar., 24: 57-61.
- Harlin M.M., B. Thorn-Miller and B.B. Thusby. 1979. Ammonium uptake by *Gracilaria* sp.(Florideophyceae) and *Ulva lactuca*(Chlorophyceae) in

- closed system fish culture. *In Proc. IXth Int. Seaweed Symp.*, (eds. A. Jensen and J.R. Stein). pp. 285-292. Princeton Science Press.
- Houvenaghel G.T. and Mathot J.F. 1983. The production of marine green algae in coastal waters and their culture in ponds enriched with waste waters. *In Energy from Biomass* (eds. A. Strub, A. Chartier, P. Schleser and G. Schleser). pp. 308-312. Elsevier Applied Science, London.
- Indergaard M. and A. Jensen. 1983. Seaweed biomass production and fish farming. *In Energy from biomass* (eds. A. Strub, A. Chartier, P. Schleser and G. Schleser). pp. 313-318. Elsevier Applied Science, London.
- Kindig A.C. and M.M. Littler. 1980. Growth and primary productivity of marine macrophytes exposed to domestic sewage effluents. *Mar. Environ. Res.*, 3: 81-100.
- Kuhl A. 1974. Phosphorus. *In Algal physiology and biochemistry* (ed. W.D.P. Stewart). pp. 636-654. Botanical Monographs Vol. 10. Blackwell Sci. London.
- Langton R.W., K.C. Haines and R.E. Lyon. 1977. Ammonia-nitrogen production by the bivalve molluscs *Tapes japonica* and its recovery by the red seaweed *Hypnea musciformis* in a tropical mariculture system. *Helgolander Wiss. Meeresunters.*, 30: 217-229.
- Lehnberg W. and W. Schramm. 1984. Mass culture of brackish-water-adapted seaweeds in sewage-enriched seawater. I. Productivity and nutrient accumulation. *Hydrobiologia*, 116/117: 276-281.
- Lin C.K. 1977. Accumulation of water soluble phosphorus and hydrolysis of polyphosphates by *Cladophora glomerata* (Chlorophyceae). *J. Phycol.*, 13: 46-51.
- Missoni G. and M. Mazzagardi. 1985. Production of algal biomass in Venice Lagoon: environmental and energetic aspects. *In Proc. 3rd. EC Conference, Venice 1985: Energy from Biomass* (eds. W. Pasix, J. Coombs and D.O. Hall). pp. 384-386. Elsevier Applied Science, London.
- Prince J.S. 1974. Nutrient assimilation and growth of some seaweeds in mixtures of seawater and secondary sewage treatment effluents. *Aquaculture*, 4: 69-79.
- Rueter J.G. and Robinson D.H. 1986. Inhibition of carbon uptake and stimulation of nitrate at low salinities in *Fucus distichus* (Phaeophyceae). *J. Phycol.*, 22: 243-246.
- Schramm W. 1991. Seaweeds for waste water treatment and recycling of nutrients. *In Seaweed resources in Europe: Uses and potential* (eds. M.D. Guiry and G. Blunden). pp. 149-168. John Wiley and Sons Ltd., UK.
- Schramm W. and W. Lehnberg. 1984. Mass cultivation of brackish-water adapted seaweeds in sewage-enriched seawater. II. Fermentation for biogas production. *In Proc. XIth Int. Seaweed Symp.* (eds. C.J. Bird and M.A. Ragan) pp. 282-287. Dordrecht, Junk.
- Schramm W. and W. Lehnberg. 1985. Aufnahme und Akkumulation anorganischer Nährstoffe durch benthische Großalgen in abwasserangereichertem Meerwasser. pp. 26. Schulßbericht MFE 0501-BMFT. Bonn: Ministry for Research and Technology.
- Schramm W. and W. Booth. 1981. Mass bloom of the alga *Cladophora prolifera* in Bermuda. Productivity and phosphorus accumulation. *Bot. Mar.*, 24: 419-426.
- Topinka J.A. 1978. Nitrogen uptake by *Fucus spiralis* (Phaeophyceae). *J. Phycol.*, 14: 241-247.
- Turner J.W.D., R.R. Sibbald and J. Hemens. 1986. Chlorinated secondary domestic sewage effluent as a fertilizer for marine aquaculture. I. *Tilapia* culture. II. Protein supplemented prawn culture. *Aquaculture*, 53: 133-155.
- Wallentinus I. 1984. Comparison of nutrient uptake rates for Baltic macroalgae with different thallus morphologies. *Mar. Biol.*, 80: 215-225.
- Yamada N. 1961. Studies on the manure for seaweeds.

I. On the change of nitrogenous component of *Gelidium amansii* Lmx. cultured with different nitrogen sources. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., 27: 953-957.

Yarish C. and T. Chopin. 1999. Developing a

sustainable *Porphyra*/salmon integrated aquaculture for bioremediation and production of food and biochemiclas. In 1999 Proc. Int. Symp. of the Korean Soc. Phycol., pp. 9-14