

海洋汚染의 연구방법 및 제반 문제점

洪 基 勳*

〈目 次〉

- I. 序 論
- II. 廢棄物의 해양방출과 해양 생태계
- III. 生態學에서의 예측
 - 1. 경험론적 연구방법
 - 2. 생물학적 연구방법
- IV. 結 論

I. 序 論

우리 인류는 지구상에 출현하여 활동을 개시함과 동시에 地球環境을 변화시켜 왔다.¹⁾ 그러나 최근에 이르기까지는 인류 활동이 초래한 지구환경의 변화는 막연하게 인식되어져 왔을뿐 그 변화가 인류에게 어떤 의미를 지니는 지에 대하여 완전히 이해가 된 것은 아니었다. 수 천년의 인

* 海洋研究所 先任研究員・海洋化學

1) 여기서의 論議는 주로 Francis P. Bretherton, "The Oceans, climate, and technology", *Oceanus* (Winter 1986/1987), pp.2-8에서 인용되었음.

류문명은 우리가 현재 경험하고 익숙해져 있는 氣候・植物相・海洋環境 그리고 土壤環境 등의 지구 환경을 이용하면서 발달해 왔다. 즉 우리는 日氣의 일일 변화나 계절 변화와 그 순환에 근거하여 農畜産業을 발전시키기도 하고, 해류의 흐름을 이용하여 해상교통을 발달시키기도 했으며 휴식할 시간과 공간을 정하기도 했다. 그러나 이러한 日常性은 때로 홍수・한발・지진・화산폭발・치명적 전염병의 확산과 같은 여러가지 自然災害로 일시적 중단을 맞기도 했고 시간이 지나면서 다시 정상상태로 회복되곤 했다.

그러나 현대문명의 발달은 우리 인류를 더 이상 자연이 펼치는 연극의 구경꾼이 아닌 능동적인 참가자로 만들어가고 있다. 즉 최근 수 세대에 걸친 에너지 소비와 農耕活動의 증대 및 자연자원의 경제적인 이용 때문에 현재로서는 예측하기 어려운 환경변화가 나타날 조짐이 있다. 이와 같은 현상은 장래에는 기후나 자연환경이 그 동안의 경험의 범주를 벗어나는 방향으로 변해갈 것임을 시사하고 있다. 따라서 우리의 후세대에게는 자연환경의 正常狀態란 개념이 현재의 우리와는 다를 것으로 예측된다. 즉 미래에 등장할 새로운 실체(reality)중 어떤것은 우리 인류에게 득이 될 것이고 어떤 변화는 해로운 것으로 나타날 것이며 혹은 이해관계가 무관한 것도 있을 것이다. 그러나 이러한 변화들은 적절한 시기에 감지되고 이해되지 않으면 그 결과는 우리 인류에게 매우 고통스러운 것으로 나타날 수도 있을 것이다. 그러므로 현대를 사는 우리들은 적어도 후손들 앞에 펼쳐지는 지구환경을 어떻게 이해할 것인가에 대한 지식의 근거를 제공하여야 한다.

본 소고에서는 인류활동의 증가에 따른 廢棄物 放出量의 증대로 인하여 주위 환경의 질이 저하되고 있는데 주위 환경중 해양환경에서의 폐기물 방출에 따른 생태계 교란(purterbation)과 그것을 연구하는 방법론과 그에 수반되는 문제점들을 정리해 보고자 한다.

II. 폐기물의 해양방출과 해양 생태계

역사시대 이래로 인구의 지속적인 증가와 산업기술의 발달은 필연적으로 인간 활동의 부산물인 폐기물의 양과 종류를²⁾ 증가시켜 왔다. 근래의 폐기물 처리 기술의 발달에도 불구하고 모든 폐기물의 적절한 처리 방법, 즉 주위환경의 질을 저하시키지 않는 처리방법이 항상 가능한 것만은 아니다. 따라서 폐기물 처리 공정을 거친 殘留物質을 주위 환경으로 내보내는 수 밖에 없다. 이들 잔류폐기물의 해양방출에 대한 環境影響 評價基準을 육지나 대기로의 방출과 마찬가지로 인간의 동물학적인 生理代謝와 인간의 복지측면³⁾, 海洋生物 측면에 두어야 할 것이다.

1970년대로 접어들면서 이러한 폐기물의 해양방출 현상은 과학자들 사이에서 뿐만 아니라 일반의 관심을 꾸준히 고조시키고 있다.⁴⁾ 지구 전체로 보면 폐기물의 해양방출은 계속적으로 증가할 것이고 또한 해양방출 행위는 慣例나 國內法 그리고 國際法에 의하여 계속 규제를 받게 될 것이다. 이러한 관례나 법들을 효과적으로 집행하기 위하여서는 고의든 혹은 사고로 인한 것이든 일단 방출된 폐기물의 해양 환경에서의 행동을 이해하는 것이 선행되어야만 할 것이다. 방출된 폐기물의 행동을 이해하기 위해서는 그 海域의 물리·화학·생물 및 지질현상을 종합적으로 이해하는 것이 필요하다.⁵⁾

방출된 폐기물은 海水의 흐름을 따라 한 지역에서 다른 지역으로 운반되기도 하고 화학작용에 의하여 폐기물의 毒性이 완화되거나 증대되기도

2) Iver W. Deudal, Bostwick H. Ketchum, P. Kilho Park, Dana R. Kester, Wastes in the Ocean, volume 1", (Wiley-Interscience, 1982), pp.3-45.

3) 최근의 金東輝, "環境資源 利用에 관한 研究: 效率 개념을 中心으로" 海洋政策研究 1 권 1호 (1986), pp.121-154등의 論文이 있다.

4) Iver W. Deudal, Bostwick H. Ketchum, P. Kilho Park, Dana R. Kester, op. cit., p.11.

5) ibid., p.399-415.

한다. 그러나 궁극적으로 폐기물 방출의 충격은 생물상에서의 변화에 의하여 현저하게 나타난다. 최근 육지에 인접한 해양 생태계는 두가지 형태의 인간활동에 의하여 衝擊을 받고 있는데 그 하나는 재생 가능한 자원의 濫獲이고 다른 하나는 폐기물 방출로 인한 충격(stress)이다.⁶⁾ 연안 해역은 그 해역 고유의 水塊運動・海底地形, 그리고 먹이 연쇄로 연결된 고유한 個體群 構造(population structure)를 가지는데 최근의 연구에 의하면 이 개체군 구조가 자연적인 변화나 인류의 활동에 의하여 변화될 수 있다는 것을 보여주었다. 특히 포식자(predator: 주로 경제적으로 유용한 어류들)계의 優點種의 변화는 북해, 타이만, 미국 북동부 해안, 남극해, 캘리포니아 해류해역, 페루 앞의 엘니노 해역, 동베링해, 발트해역 등에서 보고되고 있으며 이러한 변화는 사회 경제적으로 커다란 충격을 초래하고 있다.

예를들면 Kullenberg 는 발트해에서의 생태계 변화 요인중 인간활동에 의한 것이 가장 큰 것으로 보았다. 일례로 농경기술의 발달로 인하여 인접 육지에서 유입되는 有機物質과 營養鹽類의 공급률이 증가되어 海水表層에서의 기초 생산력이 증가되었다. 즉 발트해는 貧營養狀態에서 富營養狀態로 변해가고 있다. 그 결과 빈영양상태에서 서식하는 어류(농어: perch 나 곤돌매기: pike)가 부영양상태에서 서식하는 돔(bream)이나 황어류(roach)등으로 바뀌게 되었고 또 전체적으로 어획량도 최근 20여년간 두배로 늘어났으며 底棲生物量도 현저하게 증가하였다. 그러나 표층 해수에서의 부영양화가 심화되기 때문에 저층 해수에서는 산소 소모율이 급격하게 증가하여 최근 80여년간 無酸素 底層水塊의 크기가 현저하게 증가하고 있다. 그러므로 Kullenberg 는 전체 생태계의 관리 측면에서 인근 육상에서 유입되는 유기물질과 영양염류들의 유입량을 조절하여야 한다고 주장하였다.

그러나 우리가 沿岸海域의 生態系를 최적의 상태로 이용할 수 있는지

6) K. Sherman and L.M. Alexander, "Variability and Management of Large Marine Ecosystems", *AAAS Selected Symposium* 99(1986). Westview Press, Inc. p.319.

에 의문을 제기하는 것은 실행 가능성(feasibility)과 비용효과(cost-effectiveness)에 관한 자료가 海域資源을 효과적으로 관리할 수 있을 만큼 충분하지 못하기 때문이다. 왜냐하면 해양 생태계를 이해하여 이론적인 모델을 개발하기에는 아직까지 큰 어려움이 있을 뿐만 아니라 資源管理를 실행하였을 때 필연적으로 수반되는 사회 및 경제적인 문제들이 또한 큰 障礙要因이 되고 있기 때문이다. 그러나 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 과학자로 부터 자료를 수용하여 자원을 관리하는 制度的裝置가 필요하게 된다. 이러한 제도는 근본적으로 해역자원 사용에 관한 권한을 정립하는데 그 목적이 있으므로 이는 富의 分配에 관한 것으로 근본적으로 정치적인 것이 될 수 밖에 없다.

III. 생태학에서의 예측

근래 우리나라 沿岸海域에서 발생 빈도가 높아지고 있는 赤潮現象은 농업기술의 발달과 산업의 급격한 발달⁷⁾로 인하여 인근 육상에서의 有機物質과 營養鹽類의 공급률이 증대하고 있기 때문이다. 적조현상을 한마디로 定義해 보면 해양이나 호수등의 水塊에 존재하는 플랑크톤이 영양염류의 대량 공급으로 대량 증식하게 되어 수괴의 색깔이 플랑크톤의 고유색을 띠게되는 현상으로 볼 수 있다.⁸⁾

일반적으로 식물성 플랑크톤의 大増殖이 일어나면 동물성 플랑크톤의 個體數가 줄어드는 경향이 있고, 식물성 플랑크톤의 種數가 단조로워지는 수가 많다. 식물성 플랑크톤의 대증식은 필연적으로 수반되는 특정 영양염류의 결핍으로 중지되게 되고 결과적으로 기존의 먹이 연쇄가 파

7) 대부분의 산업체가 경제적인 이유로 해안에 위치하고 있으며 이에 따라서 인구도 해안에 집중하고 있다.

8) 일반적으로 부영양화가 진행되고 있다고 하면 환경적인 측면에서는 부정적인 의미를 내포하지만 같은 현상을 두고 생물학적 측면에서 기초생산력이 증가한다고 표현하게 되면 긍정적인 의미를 내포하게 된다.

피되어 해양환경에서의 物質循環에 이상이 생겨서 생태계 전반에 걸쳐 막대한 영향을 미치게 된다. 예를 들면 毒性 플랑크톤의 毒物質에 의한 피해나 식물성 플랑크톤의 死體의 분해에 따른 溶存酸素의 부족 등으로 漁貝類가 질식하거나 분비된 粘液物質이 어패류의 아가미에 부착되어 호흡장애를 일으키기도 한다. 그러나 각 해역마다 고유한 생태계가 존재하기 때문에 어느 특정 연안해역에 이러한 일반론을 그대로 적용하기는 어렵다.

과학의 목적은 이미 증명된 관계(established relationship)에 대한 보다 개선된 수리적 접근(fitting)에 있는 것이 아니라 그 접근을 통하여 새로운 과정(process)을 발견해 내고 지금까지 알려지지 않았던 관계들을 밝히는 것이다.⁹⁾ 生態學의 목적도 그 예외는 아니므로 생태학에서의 예측은 생태학 자체의 발전 뿐만 아니라 실제적인 측면 즉 海洋 管理者의 측면에서도 중요한 의미를 가진다. 일반적으로 예측에는 두가지 경우가 있다. 그 하나는 직접 관찰에 의한 반복적인 현상을 이용하는 것이고 다른 하나는 조작의 효과로서, 일어나는 결과에 대한 예측이다. 前者의 예로서는 클로로필의 양과 전체 磷(total P)과의 相關關係를 여러번의 관측에 의하여 얻고 새로운 자료치(data point)가 기존의 산포도의 어느 위치에 떨어지게 되리라는 유형의 예측을 들 수 있다. 일반적으로 觀察이나 測定은 어느 한 쪽으로 치우쳐질 수 있고 중요한 變數가 간과되거나 아예 무시되기도 한다. 또 변수간의 상관관계도 아무런 科學的 根據가 없는데도 불구하고 존재할 수도 있게 된다. 후자의 경우는 실제 환경의 관리라는 측면에서 매우 중요하다. 즉 廢棄物의 방출량이 증가하고 이에 따라 부영양화가 진행되고 있는 해역에서의 赤潮發生을 예측하는 것이 필요하다.

생태계의 변화를 예측하기 위하여 두 가지 방법이 이용되고 있다. 한

9) 이 부분은 두 論文 Robert Henry Peters, "The role of prediction in Limnology", *Limnology and Oceanography* 31 (1986), pp.1143-1159 와 John T. Lehman, "The goal of understanding in Limnology", *ibid.*, pp.1160-1166 의 논쟁에서 발췌한 것이다.

학파는 물질 수지(mass balance)와 에너지 변환률(conversion efficiency) 등 열역학적 제어(thermodynamic constraints)에 초점을 맞춘다(경험론적 연구방법). 따라서 이들은 생산성(productivity), 생물량(biomass), 그리고 순환률(turn over rate), 영양염류 이동(flux) 등의 복합변수(composite variable)를 측정하게 된다. 또 다른 학파는 생물체의 유전학적인 특성(genetical property)의 연구에 중점을 두고 있다(생물학적 연구방법). 따라서 이들은 出生率, 死亡率 등을 측정한다. 즉 자연선택(natural selection)이나 생물개체의 적응(individual adaptation)에 의한 進化論의 입장에 서는 것이다. 前者의 경우는 복합 변수에 근거하고 있기 때문에 생물학적인 관점에서는 매우 불리한 위치에 놓이게 된다. 왜냐하면 이것은 결코 생물체 자체(living entity)의 유전학적 성질(genetic integrity)을 전혀 논외로 하기 때문이다. 그러므로 전자의 방법을 이용한 모델을 적용하여 얻은 결과인 모범(paradigm)은 원칙적으로 非生物學的인 것이다. 그러나 현재로서는 해양 생태계를 구성하고 있는 생물種들의 유전학적인 특성들이 잘 알려져 있지 못하므로 전자의 연구방법은 여전히 중요한 위치를 점하고 있다. 한편, 생물학적 특성(biological property)과 군집(community)이나 먹이 연쇄역학(food web dynamics) 등과 연결시키는 접근 방식이 새로이 모색되고 있어서 생태연구에 크게 기여할 것으로 보인다.

1. 경험론적 연구 방법

해양 생태계를 단순화 시켜보면 식물성 플랑크톤이 무기 영양염류와 빛을 이용하여 유기물질을 생산하고, 식물 플랑크톤은 초식 동물(주로 동물성 플랑크톤)에 의하여 먹히거나 해저에 가라앉게 된다. 해저에 존재하는 박테리아를 포함하는 detrital consumer가 해저로 도달한 유기물을 섭취하여, 성장하고, 호흡하며, 재생산에 필요한 에너지를 얻는다. 이러한 2차 이상의 생산자들은 老廢物을 방출하게 되어 무기 영양염류를 다시 식물 플랑크톤에 공급하게 된다. 이러한 해저-수괴 관계(benthic

-pelagic coupling)는 수심이 얇은 연안해역에서는 매우 중요하다.

Hargrave¹⁰⁾는 해저의 유기물 퇴적은 基礎生産이 증가하면 비례적으로 증가하나 mixed layer depth 에는 반비례한다는 것을 보여 주었다. 일반적으로 여름철 수온약층(thermocline)이 10~15m 정도인 연안 해역에서는 식물성 플랑크톤에 의하여 생산된 유기물 중 30~40% 가량이 해저로 가라앉게 된다. 보통 연안 해역에서의 식물성 플랑크톤의 기초 생산력이 $100\sim200\text{g Cm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 가¹¹⁾ 되므로 그중 $30\sim80\text{g Cm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 가 바닥으로 가라앉는다고 볼 수 있다. 그러나 육지로 부터 유기물이 공급되거나 대형 해조류(macrophyte)가 대량 서식하고 있는 해역은 해저로 도달하는 유기물의 양이 $300\text{g Cm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 에 이르기기도 한다.¹²⁾

독일 Kiel Bight 는 수심이 20m 밖에 안되는 淺海이므로 월동하는 동물성 플랑크톤이 매우 적어 식물성 플랑크톤의 춘계 대번식(spring bloom)기간에는 이 기간동안 생산된 유기물의 절반 정도가 바닥으로 가라앉는다.¹³⁾ 이러한 대량의 유기물이 해저에서 분해및 이용될 때, 즉 환원된 탄소가 산화될 때 많은 산소를 요구하게 된다. 해저면에서의 유기물 분해과정에서 용존산소를 흡수(uptake)하는데 영향을 주는 인자로서는 용존산소의 농도와 해수의 교란(turbulence)이다.¹⁴⁾ 산소 공급이 중단되면 질소 산화물, 망간 산화물, 철 산화물, 그리고 황산 이온이 각 단계의 특정 박테리아 효소계의 전자 수용체(electron acceptor)로서 열역학적으로 에너지를 많이 발생하는 순으로 이용되나 황산 이온을 제외하

10) Barry T. Hargrave, "Coupling carbon flow through some pelagic and benthic communities", *J. Fish Res. Bd. Can.* 30(1973), pp.1317-1326.

11) K.H. Mann, "Ecology of coastal waters, A systems approach", University of California Press (1982), p.89.

12) *ibid.*, pp.53-80.

13) V. Smetack, K. Von Bröckel, B. Zeitzschel and W. Zenk, "Sedimentation of particulate matter during a phytoplankton spring bloom in relation to the hydrographic regime", *Marine Biology* 47(1978), pp.211-226.

14) Bo Barker Jørgensen and Niels Peter Revsbech, "Diffusive boundary layers and the oxygen uptake of sediments and detritus", *Limnology and Oceanography* 30(1985), pp. 111-122.

면 그 전체적인 양이 적어 그다지 중요하지 않다.¹⁵⁾ 유기물이 황산이온에 의하여 산화되고 그 副産物로 탄산가스와 황화수소가 발생하고 이 황화수소는 용존산소를 소비하여 황산이온으로 다시 돌아가게 된다. 경제적으로 중요한 해양 생물은 대부분 산소를 필요로 하기 때문에 용존 산소의 존재는 연안 환경에서 가장 중요한 環境因子 중의 하나이다. 아래에서 간단한 연습을 통하여 우리나라 남해안에서 황화수소가 포함되는 無酸素層이 형성된다는 사실을 검토해 보고자 한다.

산소의 공급과 소모

어떤 주어진 시간에 대부분의 해수는 대기의 平衡狀態를 이루지 못한다. 예를들면 낮동안에 식물성 플랑크톤에 의한 광합성은 용존산소의 過飽和를 유발시킬 수 있을 만큼이나 빠르고 또 반대로 밤에는 동식물의 호흡활동이 용존 산소를 고갈시킬 수 있을 만큼이나 빠르기 때문이다. 또한 해수면에서의 파도의 작용에 의하여 산소가 과포화 상태로 녹기도 한다. 그러나 일반적으로는 주된 산소의 공급원은 대기이고 주된 소모 요인은 유기물의 분해이다.

대기

일반적으로 비반응성 휘발 물질(non-reactive volatile compounds)의 대기와 해수와의 교환은 다음의 경험식에 의거한다.¹⁶⁾

$$J = k_g (C_s^s - C_g)$$

여기서 J 는 단위면적당 이동률($\text{mol cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)이고 K_g 는 이동계수(transfer coefficient; cm s^{-1})이다. C_g^s 는 대기와 평형을 이루고 있을

15) P.N. Froelich, G.P. Klinkhammer, M.L. Bender, N.A. Luedtke, G.R. Heath, D. Cullen, P. Dauphin, D. Hammond, B. Hartman, and V. Meynard, "Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern Equatorial Atlantic, suboxic diagenesis", *Geochim Cosmochim. Acta* 43(1979), pp.1075-1090.

16) François M. Morel, "Principles of Aquatic Chemistry", Wiley-Interscience (1983), pp. 164-167.

때의 용존산소의 농도(mol l^{-1})이다. 그리고 C_g 는 관심 해수의 용존산소 농도이다. 대기와 해수간의 가스 교환을 설명하는 두가지 물리 모델이 있는데 그 한가지는 surface film model 이고 다른 하나는 surface renewal model 이다. 그러나 아직까지는 두 모델 중 어느 것이 실제 현상을 더 적절하게 설명하는 지는 잘 알려져 있지 않다. 여기서는 간단한 surface film model을 적용하려 한다. K_g 는 해수면의 특성(hydrodynamic condition)에 의존하며 해양 화학자들은 흔히 이 이동계수 K_g 를 piston velocity로 여기며 그 값은 10^{-4} 에서 10^{-2}cm s^{-1} 이다. 수온 20°C , 염분 30‰인 우리나라 여름철의 가상적인 연안 해역을 설정해 놓고 위의 방정식에 필요한 값들을, K_g 는 10^{-4} 에서 10^{-2}cm s^{-1} , C_g^s 는 0.24mmol l^{-1} , C_g 는 0.18mmol l^{-1} 로 취하면 대기로 부터 해수로의 산소 이동률 J 는 K_g 가 10^{-2}cm s^{-1} 인 경우에 $0.5\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 가 되고 K_g 가 10^{-4}cm s^{-1} 인 경우에는 $0.005\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 가 된다. K_g 가 큰 경우는 수괴의 교란이 심한 경우이고, K_g 가 작은 경우는 수괴의 성층이 가장 발달한 경우로 볼 수 있을 것이다.

기초 생산

일반적으로 연안해역에서는 식물 플랑크톤에 의한 기초 생산이 $12\text{mol C m}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 가 넘는 것이 보통이므로 기초 생산에 의한 산소 공급은 대략 $0.03\text{mol O}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 라고 볼 수 있을 것이다.

산소의 소모

해수 중에서의 산소 소비는 그 양이 적지 않을 것이나 수심이 얕은 연안해역에서는 해저에서의 산소 소모가 주된 용존 산소의 sink 이므로 여기서는 해저에서의 산소 소모만 다루기로 한다. 이제까지 보고된 해저에서의 산소 소모율중의 일부는 아래의 표에 나타낸 것과 같다.

다음의 표에서 알 수 있듯이 부영양화된 해양 환경에서는 해저에서의 산소 소모율이 높음을 알 수 있다. 우리나라 대부분의 연안 해역은 적조 발생의 보고가 흔하므로 표1에서 가장 높은 값을 취하여 가상 해역에 대한 산소 수지를 계산하여 보면 다음과 같다.

表 1. 세계 주요 연안 해역의 용존 산소 소모율

장 소	수심 (m)	수온 (°C)	산소 소모율 (mol O ₂ m ⁻² d ⁻¹)
미국 Puget Sound ¹⁷⁾	22	7	0.008-0.02
발트해 ¹⁸⁾	22	7	0.01
영국 스코틀랜드내만 ¹⁹⁾	17		0.01
미국 Mid-Atlantic Bight ²⁰⁾ (폐기물 방출해역)	20	14.8	0.04-0.05
덴마크 Limfjorden ²¹⁾	4-12	0-20	0.01-0.07

表 2. 가상해역의 용존 산소 수지

단위 : mol O₂ m⁻² d⁻¹

구 분	해수의 교란이 심한 경우	성층이 발달한 경우
공급 대기	0.5	0.005
기초생산	0.03	0.03
소모 해저	0.07	0.07
수지	+0.46	-0.035

- 17) Mario M. Pamatmat, "Oxygen consumption by the seabed. IV. shipboard and laboratory experiments", *Limnology and Oceanography* 16(1971), pp.536-550.
- 18) David B. Nedwell, Sven-Eric Hall, Agneta Anderson, Ake F. Hagström, and Börje Lindström, "Seasonal changes in the distribution and exchange of inorganic nitrogen between sediment and water in the Northern Baltic (Gulf of Bothnia) Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, 17(1983), pp.169-179.
- 19) A.J. Pomroy, I.R. Joint, and K.R. Clarke, "Benthic nutrient flux in a shallow coastal environment", *Oecologia* 60(1983), pp.306-312.
- 20) Gilbert T. Rowe and K.H. Smith, Jr., "Benthic-Pelagic Coupling in the Mid-Atlantic Bight", In B.C. Coull (1977), *Ecology of Marine Benthos*, University of South Carolina Press, pp.55-65.
- 21) Bo Barker Jørgensen, "The sulfur cycle of a coastal marine sediment(Limfjorden. Demark)", *Limnology and Oceanography* 23(1977), pp.814-832.

즉 수심 10m인 해역이 폭풍 등에 의하여 완전히 뒤섞인 후 成層이 강하게 발달하는 경우에는 대기와 해수간의 평형상태의 산소 농도가 $0.24\text{mol O}_2\text{m}^{-3}$ 이어서 전체 해수의 용존 산소량이 $2.4\text{mol O}_2\text{m}^{-2}$ 가 된다. 해저에서의 산소 소비량 $0.07\text{mol O}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 만 고려한다면 해수중의 산소가 완전히 고갈되는데 한달이면 족하게 된다. 위에서의 연습은 용존산소의 다른 수괴에 의한 수평적인 공급(lateral transport)을 무시한 경우이다. 이는 역설적으로 해수의 교환이 얼마나 중요한 것인가를 말하여 주는 것이다. 그러나 우리나라 남해안의 해역 대부분은 많은 섬들로 둘러싸여 있어서 해수의 순환이 완만하므로 여름철에 수괴의 성층화가 이루어지면 대기로 부터의 산소 공급이 거의 차단된다. 따라서 산소—무산소 경계면(oxic-anoxic boundary layer)이 海底堆積層으로 부터 해수 중으로 올라오게 된다. 이러한 무산소층의 발달은 해수 중이나 해저에서 서식하는 경제적인 海洋生物 資源에 악영향을 끼치게 되고 금속 산화물이 환원되어 금속이온의 농도 또한 증가하게 되어 기존의 생태계에 큰 타격을 주게 되는 것이다.

2. 생물학적 연구 방법

폐기물의 해양방출의 한 결과로 나타나는 부영양화 및 적조는 앞에서 언급한 바와 같이 식물 플랑크톤의 異常繁殖 現象이므로 해양환경에서 이들 생물체의 행동을 연구하는 것이 필요하다.²²⁾ 여기서는 위의 III. 1 경험론적 연구 방법을 비판하는 방식으로 설명해 보고자 한다.²³⁾

20여년전 Vollenwider(1968)는 기존의 湖沼學이 공해 문제에 대한 효과적인 해결책을 제시하지 못함을 발견하고 호소 관리에 대한 새로운 방법을 고안하기에 이르렀다. 그 새로운 연구 방법은 경험주의에 입각하여 전체 생태계(whole system)의 현저한 특성(salient property)을 예측하

22) 여기서의 논의는 John T. Lehman, 前掲書 參照.

23) 필자가 生物學者가 아닌 관계로 이 부분의 논의가 소홀함을 피할 수 없으나 脚註 9)에서 소개한 두 논문을 參照하기 바람.

려는 것이었다. 그 한 예로는 공중 위생의 입장에서 호소에서 인산염 부하량(P-loading)과 클로로필의 양 사이의 회귀 방정식(regression-based equation)의 도출을 들 수 있겠다. 이러한 통계적 예측 능력은 환경 관리자와 같이 개개 生物種들의 생물학(biology)에는 관심이 없고 오직 응용목적에만 관심이 있는 사람들에게는 매우 유혹적인 것이었다. 그러나 만일 통계적으로 보여준 어떤 상관 관계가 실제기구(mechanism)로서 입증되는지를 알지 못하면 어떠한 조건하에서 그 관계가 실패하게 될런지 알 수 없게 된다. 왜냐하면 생물 시스템(biological system)은 매우 복잡하게 얽혀있고 그 복잡성은 주로 생물체의 특성에 기인하기 때문이다. 어느 한 種의 存在有無가 전체 생물군집(entire community)의 구성(organization)에 크게 영향을 미치는 경우가 빈번히 발생하기 때문이다.

富營養化에 따른 생태학적 과정에 관한 많은 경험 방정식들이 얻어졌으나 생태계 전반에 걸쳐서는 상당히 제한적인 의미를 갖는 것이 대부분이다. 즉 통계학적 또는 수학적 모델이 제공할 수 있는 정보는 그 모델의 가정에 포함된 모든 가능성에 대한 예측 뿐이다. 따라서 이러한 모델은 미리 예견하지 못했던 현상이 출현하였을 때 실마리 조차도 제공하기가 힘들다. 자연적인 요인에 의하여서건, 인간 활동의 결과에 의해서건 湖沼나 沿岸 海域의 생태계의 교란(perturbation)은 어느 정도는 새로운 경험(novel experiment)이다. 여기서 새로운 경험이라고 말하는 이유는 그 어느 생태계도 서로 같지 않아서, 다른 호소나 연안해역에서 얻어진 영양염류 負荷와 부영양화 사이의 회귀방정식이 관심대상이 되는 호소나 연안 해역에서 적용되지 않는 경우가 많다. 예를 들면, 미국 Lake Washington²⁴⁾과 Lake Michigan에서의 *Daphnia*의 증식은 영양염 負荷量이 무시할 만큼 적게 변하였는데도 불구하고 투명도와 클로로필의 농도에 커다란 변화를 주었다. 이는 통계적 모델 만으로는 예측하기가 어

24) W.T. Edmondson and A.H. Litt, "Daphnia in Lake Washington", *Limnology and Oceanography* 27(1982), pp.272-293.

려운 것이다. 왜냐하면 생물계(biological system)는 자연 선택에 의한 진화에 의존하고 이 과정의 결과(outcome)는 논리적으로 항상 예측이 가능한 것이 아니기 때문이다. 더구나 인간 활동에 의한 생태계의 조작(manipulation)은 실제로 진화과정을 촉진한다고 보기는 어렵다. 그러나 이 조작은 다양할 가능성이 있는 종집단(a large potential species pool)으로부터 군집구조(community structure)를 변경시키게 된다. 이러한 개체군 수준(population level)에서의 작용과정은 복합모델(composite-based model)에서의 예측을 곤란하게 한다. 그러나 생물학의 진전은藻類(algae) 개개의 속성이나 생태권이 등에 관한 지식을 축적시킴으로써 세포의 크기나 클로로필 혹은 전체 인(total-P)에 주로 의존하는 통계모델에 반하여 代案을 제공해 줄 수 있을 것이다. 예를 들면 호소에 P가 충분히 공급되고 N이 적게 공급되면 질소 고정 박테리아가 성장하게 되는데 이는 세포의 크기 때문이 아니라 세포 생리(cell physiology)와 대사경로(metabolic pathway) 때문이다.

규소(Si)의 공급이 충분하면 *Synedra*의 점유 비율이 높아서 P 제한이 나타나고 또 빛의 공급이 제한되면 수괴의 교란작용(turbulence)의 중요성이 커지게 된다. 특히 조류(algae)에서는 특정 種이 증식되거나 감소되는데 이는 이들의 생리적인 요인 즉 Si에 대한 필수적인 의존 때문이거나 질소 고정에 대한 가능성 또는 단일자원(a single resource)을 이용하는 특이한 능력 때문인 것으로 여겨지고 있다. 그러므로 생물체의 급성장(vigorous growth)등의 생물 자체의 생물학을 연구함으로써 전체 군집(whole community)을 이해하는 것이 가능할 것이다.

IV. 結 論

최근 우리나라의 산업이 급격하게 발달함에 따라서 해양으로 방출되는 폐기물의 양은 계속하여 증가하고 있어 주변 海洋環境 특히 연안 해역은 날로 가중되는 스트레스로 시달리고 있다. 폐기물 방출에 의한 해양환경의 스트레스는 궁극적으로 생태계의 변화에 의하여 나타나게 되므로 해양환경

을 효과적으로 관리하기 위해서는 생태계의 변화를 예측하는 것이 필요하다.

현재 생태계에 대한 접근 방법은 경험론적 연구 방법과 생물학적 연구 방법의 두 가지로 대별된다. 경험론적 연구방법을 중시하는 학파는 物質收支와 에너지 변환율등 열역학적 제어에 초점을 맞추어 생산성(productivity), 생물량(biomass), 순환율(turn-over rate), 그리고 이동량(flux)등의 복합변수를 연구대상으로 한다. 반면에 생물학적 연구 방법을 중시하는 진화론의 입장에서 자연 선택(natural selection), 생물 개체의 적응(individual adaptation)등 유전학적 특성과 생물체 자체의 성질(biological property)을 연구 대상으로 삼는다.²⁵⁾ 그러나 前者의 연구방법은 定量的으로 생태계의 상태를 기술하기에는 적절한 것이어서 해양환경 관리의 측면에서는 매력적인 방법이나, 생물체의 생물학적 특성을 무시하는 비생물학적 접근방법이라는 비난을 면하기는 어렵다. 그러나 현재로서는 해양 생태계를 구성하고 있는 모든 生物種들의 생물학적 특성이 잘 알려져 있지 않아서 앞으로도 생태계를 연구하는 중요한 도구로 남을 것이다. 그러나 최근의 먹이연쇄 역학(foodweb dynamics)등의 경험론적 연구방법과 생물학적 연구방법을 연결시키는 접근방법이 모색되고 있어서 폐기물 방출에 의한 연안 해역의 스트레스 즉 생태계의 변화를 예측하는데 크게 기여할 것으로 보인다.

25) D. Scavia, G.L. Fahnenstiel, M.S. Evans, D.J. Jude, and J.T. Lehman. "Influence of salmonid predation and weather on long-term water quality trends in Lake Michigan", *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 43(1986), pp.435-443.