

제2장 식물플랑크톤

1. 종류 및 분류

계통분류학적의 기초

계급 (category) : 계 문 강 목 과 속 종

Whittaker의 5 kingdom

Monera, Protista, Fungi, Animal, Plant

표 2.1 해양 식물플랑크톤 종들이 소속된 주요 상위 분류군 (Tomas, 1993)

분류군 명	특 징
PROTOKARYOTA (原核生物)	진정한 핵이 없음
Cyanophyta (藍細菌門)	색소: c-phycoerythrin, c-phycoerythrin 편모 없음
Cyanophyceae (남색균강)*	
Chroococcales	
Nostocales	
Prochlorophyta (原綠藻門)	색소: chlorophyll b, phycobilin은 없음
Prochlorophyceae (원록조강)	편모 없음
Prochlorales	
EUKARYOTA (真核 生物)	진정한 핵이 있음
Rhodophyta (紅藻植物門)	색소: r-phycoerythrin, r-phycoerythrin
Bangiophyceae (원시홍조강)	편모 없음 (ACONTA)
Porphyridiales	
Glaucophyta (灰藻植物門)	색소: c-phycoerythrin, c-phycoerythrin
Glaucophyceae (회조강)	편모 있음 (CONTOPHORA)
Glaucocales	담수종(3종)만 보고됨
Chromophyta (黃色藻植物門)	색소: 카로티노이드
Cryptophyceae (은편모조강)	편모 있음 (CONTOPHORA)
Cryptomonadales	
Dinophyceae (와편모조강)	
Prorocentrales	
Dinophysiales	
Gonyaulacales	
Peridinales	
Prymnesiophyceae (= Haptophyceae 착편모조강)	
Isochrysidales	
Coccolithophorales	
Prymnesiales	
Pavloales	
Chrysophyceae (황갈조강)	
Bicosoecales	
Ochromonadales	
Synurales	
Chrysosphaerales	
Sarcinochrysidales	

표 2.1 계속

분류군 명	특 징
Dictyochophyceae (규질편모조강)	
Rhizochromulinales	
Pedinellales	
Dictyochales	
Bacillariophyceae (돌말강)	편모 없음
Biddulphiales	중심돌말 (centric diatom)
Bacillariales	깃돌말 (pennate diatom)
Rhaphidophyceae (침편모조강)	
Chattonellales	
Chlorophyta (綠藻植物門)	색소: chlorophyll b
Euglenophyceae (유글레나강)	편모 있음 (CONTOPHORA)
Euglenales	
Prasinophyceae (담록조강)	
Mamiellales	
Chlorodendrales	
Chlorophyceae (녹조강)	
Volvocales	
Chlorococcales	

*일반적으로 cyanobacteria라 한다.

1.1 일반적인 특징

세포 모양, 크기, 세포벽, 점액층, 엽록체, 편모, 저장물질 등

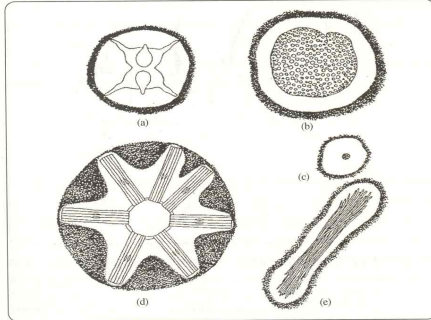


그림 2.1 부유성 조류의 점액질층(mucilaginous sheath). (a) *Staurastrum*, 장구말의 일종. (b) *Coelosphaerum*, 근체성 남조류의 일종. (c) *Coelosphaerum*의 개체세포. (d) *Tabellaria*, 돌말류의 일종. (e) 남조류인 *Aphanizomenon flos-aquae*의 사상체

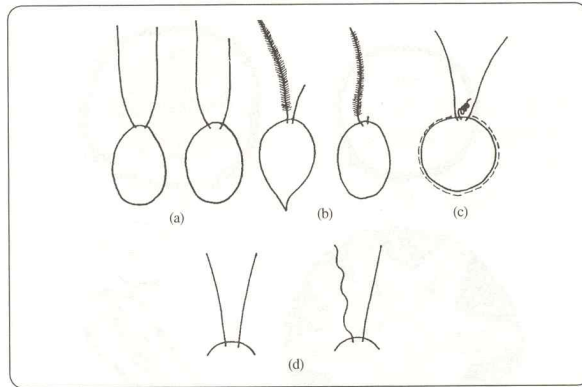


그림 2.2 단세포 조류의 편모. (a) 좌측: 같은 길이의 곧은 편모, 우측: 길이가 다른 곧은 편모. (b) 좌측: 길이가 다른 편모로서 긴 편모에는 미세한 돌기들이나 있다. 우측: 짧은 편모는 퇴화되어 있다. (c) 같은 길이의 곧은 편모와 그 사이에 나선형 착편모(coiled haptonema)가 있다. (d) 좌측: 진동유형이 같은 상동편모(homodynamic flagella), 우측: 진동유형이 다른 이질편모(heterodynamic flagella)

1.2 종류

1.2.1 Diatom

가장 흔한 식물플랑크톤 (중심돌말, 깃돌말)

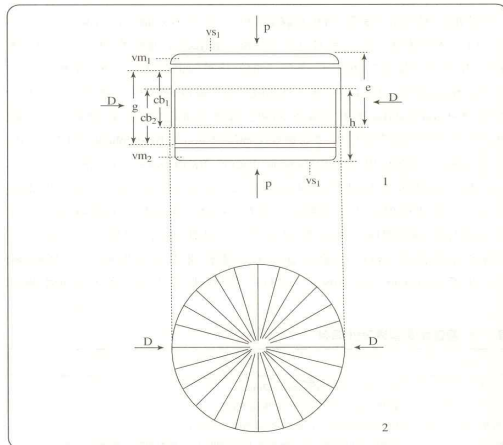


그림 2.3 중심돌말의 피각과 세부 명칭. 1. 옆보기(girdle view), 2. 내려보기(valve view): 세부명칭: e - 위뚜껑(epitheca), h - 아래뚜껑(hypotheca), vs - 뚜껑면(valve surface), vm - 각부(valve mantle), g - 둘레띠(girdle); cb₁ - 위둘레띠(epicingulum), cb₂ - 아래둘레띠(hypocingulum)

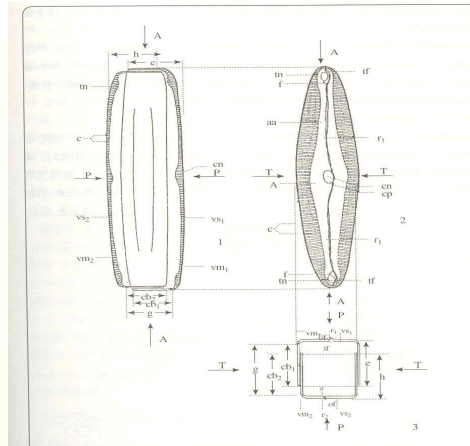


그림 2.4 깃돌말의 피각과 세부 명칭. 1. 넓은 옆보기(broad girdle view), 2. 내려보기(valve view), 3. 좁은 옆보기(narrow girdle view): 세부명칭: e - 위뚜껑(epitheca), h - 아래뚜껑(hypotheca), vs - 뚜껑면(valve surface), vm - 각부(valve mantle), g - 둘레띠(girdle), cb₁ - 위둘레띠(epicingulum), cb₂ - 아래둘레띠(hypocingulum), cn - 중앙혹(central nodule), m - 끝혹(terminal nodule, polar nodule), r - 등줄(raphe), f - 깔때기턱(funnel cleft), cp - 중심구멍(central pore), aa - 정축역(axial area), ca - 중앙역(central area), c - 늑막(costae)

표 2.2 돌말류의 일반적인 특징

항 목	특 징
크기	현미경적 크기(수 $\mu\text{m} \sim 2\text{mm}$)
조직	단세포성이며, 흔히 군체를 이룬다.
편모	1개의 편모가 용성 배우세포에만 있다.
색소	Chlorophyll a & c, β -carotene, fucoxanthin, diatoxanthin, diadinoxanthin
저장물질	Chrysolaminarin, oil droplet
운동성	등줄면(raphe valve) 돌말에서 나타남
서식환경	해수-담수, 얼음 속-온천, 토양 내-공기 중-수중-퇴적물 표층, 생물체 내-생물체 표면

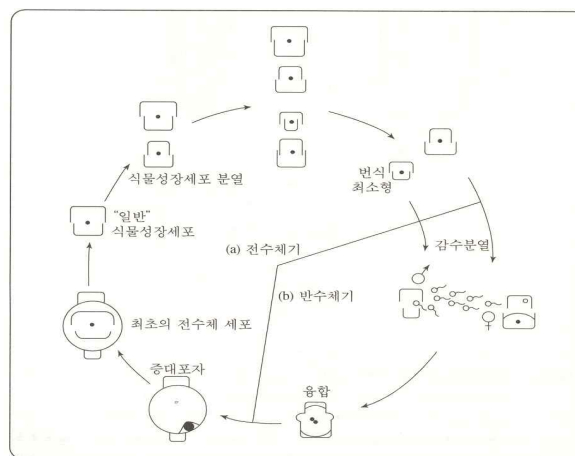


그림 2.5 중심돌말의 유성생식. (a) 전수체기(diploid stage), (b) 반수체기(haploid stage)

1.2.2 와편모류

Dinoflagellates Dino = whirling, Di = two

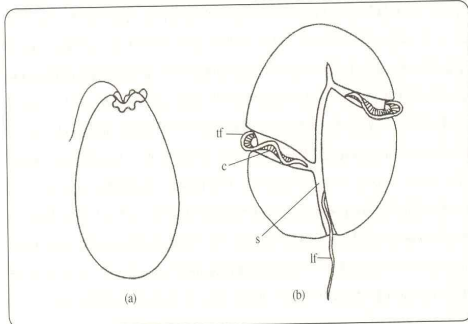


그림 2.6 정단외편모류와 축외편모류의 특징. (a) 정단외편모류, (b) 축외편모류: 세부명칭: c - 가로홈(cingulum 또는 transverse groove), s - 후미홈(sulcus 또는 longitudinal groove), lf - 꼬인편모(transverse flagellum), lf - 종편모(longitudinal flagellum)

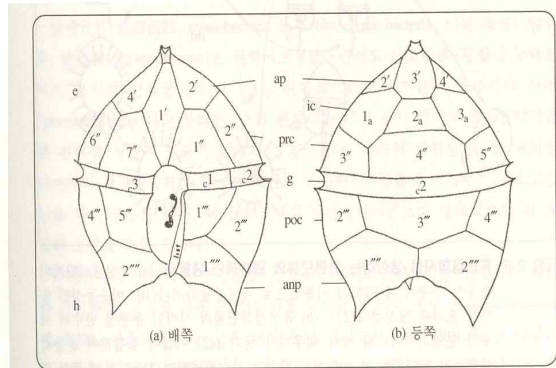


그림 2.7 세포벽 판의 종류와 명칭의 예. (a) 배쪽, (b) 등쪽: 세부명칭: c - 상각(epithea), h - 하각(hypotheca), ap - 정단판(apical plate), ic - 중간판(inter-calary plate), prc - 전대판(precingular plate), g - 가로홈판(girdle plate), poc - 후대판(postingular plate), anp - 후단판(antapical plate)

표 2.3 외편모류의 일반적인 특징

항 목	특 징
영양형태	광합성, 종속영양, 혼합영양 및 요구영양(auxotrophic)
조직	단세포성이며, 군체를 이루기도 한다.
편모	2개의 이형편모
핵	대부분의 종은 반수체, 핵막과 핵인은 상존함. 전체 간기 중 응축된 띠 형태의 염색체(dinokaryon)
색소	Chlorophyll a & c ₂ , β-carotene, peridinin, fucoxanthin 및 유도체, 기타 xanthophyll(공생자인 경우 더욱 다양함)
저장물질	Starch(polyglucan), oil(C ₁₄ , C ₁₆ , C ₁₈ 및 C ₂₂ 불포화 지방산)
세포벽	다중막과 소포(vesicle)가 얹힌 복합체
서식환경	해수-담수, 부유성, 부착성, 공생-기생

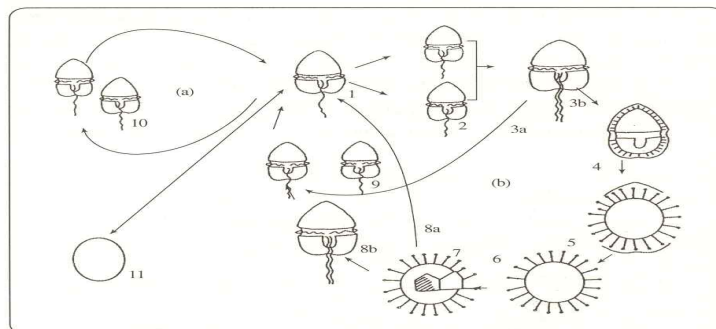


그림 2.8 휴면집합자를 생산하는 외편모류의 일반적인 생활사. (a) 무성생식단계의 운동성 반수체 세포(1)가 이분법으로 세포분열하거나(10) 비운동성인 일시성 포자를 형성한다(11). (b) 유성생식단계의 시작한 운동성 반수체 세포가 분열하여(1) 한 쌍의 배우자가 생기고(2) 이들이 융합하여 운동성 집합자가 된다(3). 이 운동성 집합자는 감수분열하여(3a) 다시 운동성 반수체 세포를 만들거나(9) 포자를 만드는데(4) 이 포자가 커지게 되면(5) 휴면집합자가 된다(6). 휴면집합자는 발아하여(7) 다시 운동성 집합자가 되어(8b) 감수분열 후 다시 운동성 반수체 세포를 만들거나(1) 혹은 발아 중 감수분열이 일어나(8a) 직접 운동성 반수체 세포가 되기도 한다.

1.2.3 남세균류

표 2.4 남세균류의 일반적인 특징

항 목	특 징
영양형태	산소발생-광합성 (oxygenic photosynthesis)
세포조직	원핵성 세포조직
편모	없음
틸라코이드	날개로 떨어져 있음
색소	Chlorophyll a, phycocyanin, phycoerythrin, β -carotene, zeaxanthin, echinenone, canthaxanthin, oscillaxanthin
저장물질	Cyanophycin(아미노산 중합체), cyanophytan starch
세포벽	다당류 질의 껍질층(sheath)으로 단독세포나 남조사(藍藻絲, trichome)를 둘러싼다.
서식환경	해수-담수-육상, 암석 표면-암석 내부

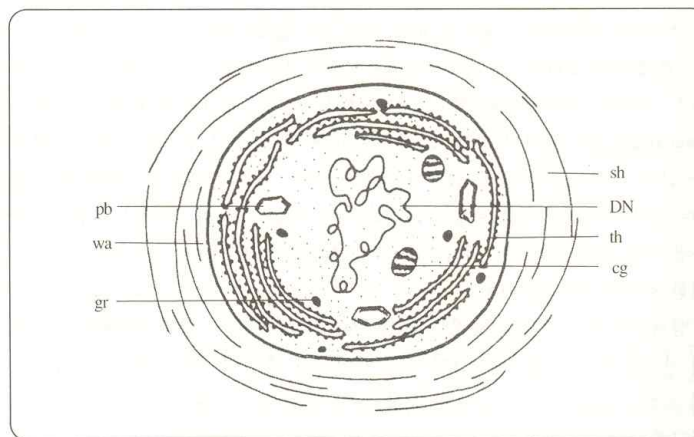
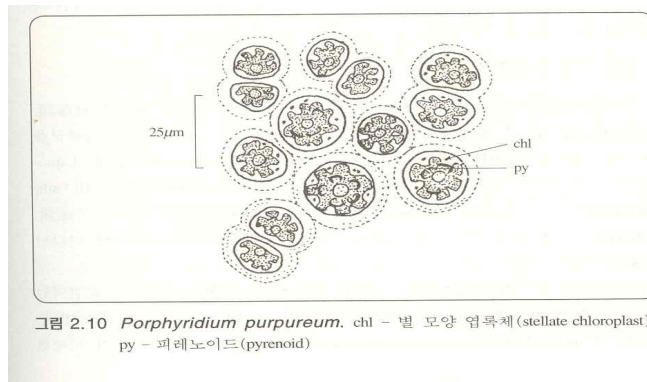


그림 2.9 소구체목 남세균 세포의 단면. sh - 다당류 껍질층(sheath), wa - 세포벽 (cell wall), th - 피코빌리솜이 붙은 틸라코이드 (thylakoid with phycobilisome), cg - 시아노피신 입자(cyanophycin granule), pb - 카르복시솜(carboxysome 또는 polyhedral body), gr - 기타 입자

1.2.4 홍조류

표 2.5 붉은틀목(Porphyridiales) 홍조류의 일반적인 특징

항 목	특 징
색소	Chlorophyll a, r-phycocyanin, r-phycoerythrin, α -carotene, β -carotene, zeaxanthin
개체의 조직	단세포성(느슨한 덩이 또는 군체를 형성하기도 함)
편모	없음
엽록체	1개(별 모양 엽록체)
저장물질	Floridean starch(홍조녹말)
세포간 연락	막공도관(膜孔導管, pit connection)이 전혀 없다.
생식	무성생식(세포분열)



1.2.5 기타 편모류

표 2.6 기타 편모류의 일반적인 공통점

항 목	특 징
운동성	뛰어남(편모)
세포크기	Nanoplankton(2~20µm), 일부는 picoplankton(1.5~2.5µm)
영양형태	광합성, 종속영양, 혼합영양
편모의 특징	수, 모양, 미세구조, 용도, 비늘의 특징 등이 종 검색의 열쇄임
생식	흔히 이분열. 종류에 따라 다양(다분열, 동형집합, 포자형성)
생태적 중요성	해양 세균섭식자, 섬모충류 및 유생의 먹이

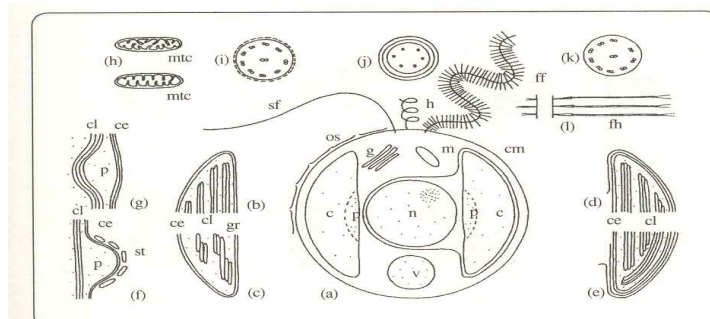


그림 2.11 편모류의 특징적 미세구조. (a) 일반 편모류의 단면 모식도로서 민편모 (sf: smooth flagellum 또는 naked flagellum), 잔털편모(ff: flimmer flagellum), 착편모(h: haptonema), 유기질 비늘(os: organic scales), 세포막(cm: cell membrane) 등이 외부에 있다. 내부에는 2개의 엽록체(c: chloroplast)가 있는데, 하나는 핵(n: nucleus)과 외막을 공유하고 있다. 이외에도 골지체(g: Golgi complex), 미토콘드리아(m: mitochondrion) 그리고 액포(v: vacuole) 등이 보인다. (b)~(e) 엽록체의 부분 단면도: (b) 은편모류의 이중의 엽록체 막(ce: chloroplast envelope)과 2층의 틸라코이드로 된 엽록체 박층(cl: chloroplast lamellae), (c) 녹조강의 그라나(gr: grana) 유사구조, (d) 유글레나류와 와편모류의 3층의 틸라코이드로 된 엽록체 박층 및 3층의 엽록체 막, (e) 황갈조강의 3층의 틸라코이드로 된 엽록체 박층 및 4층의 엽록체 막(최외막은 핵과 공유함); (f), (g) 두 종류의 피레노이드: (f) 은편모류의 녹말(st: starch)층과 피레노이드, (g) 전분층이 없이 내려앉은 피레노이드; (h) 관형벧 미토콘드리아(mtc: mitochondrion with tubular cristae)와 민벧 미토콘드리아(mfc: mitochondrion with flattened cristae)의 단면 모식도; (i), (j) 편모의 단면 모식도: (i) 비늘 있는 편모, (j) 민편모; (k) 착편모의 단순 모식도; (l) 잔털편모 위의 편모잔털(fh: flagella hair)

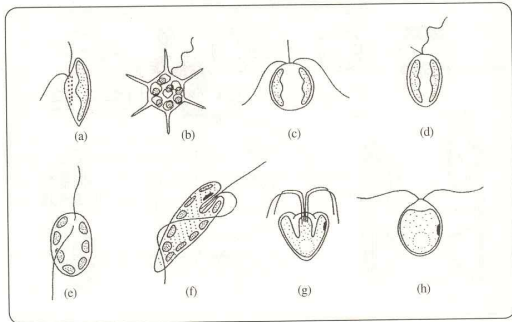


그림 2.12 기타 편모류(naked flagellates)들의 소속 강별 형태적 특징 (Modified from Tomas, 1993). (a) 은편모강, (b) 규질편모조강, (c) 착편모조강, (d) 황갈조강, (e) 침편모조강, (f) 유글레나강, (g) 담록조강, (h) 녹조강

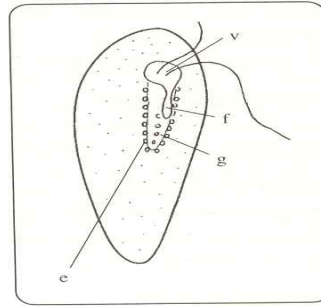


그림 2.13 은편모류의 일반적인 형태. v-입(vestibulum), f/g-세포홈(furrow/gullet), e-사출포(ejectosome)

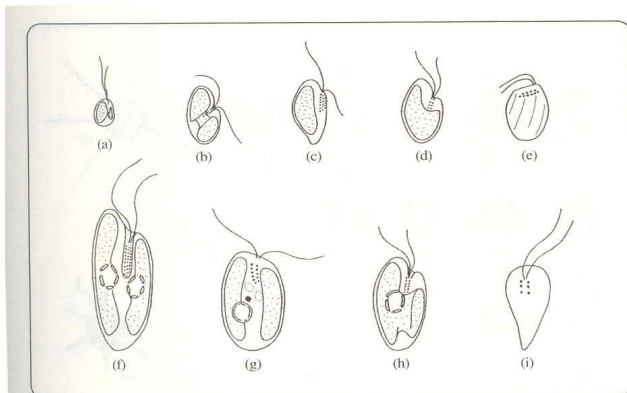


그림 2.14 대표적인 해양 은편모류속. (a) *Hilea*, 2~2.5 μ m, (b) *Hemiselmis*, 4~8.5 μ m, (c) *Plagioselmis*, 5.5~8 μ m, (d) *Rhinomonas*, 5~10 μ m, (e) *Goniomonas*, 5~10 μ m, (f) *Cryptomonas*, 15~40 μ m, (g) *Chroomonas*, 4~20 μ m, (h) *Rhodomonas*, 10~30 μ m, (i) *Leucocryptos*, 15~18 μ m

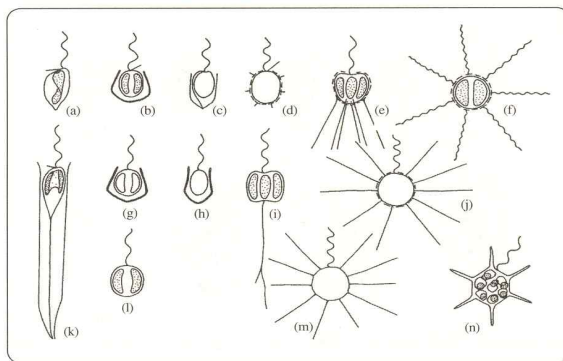
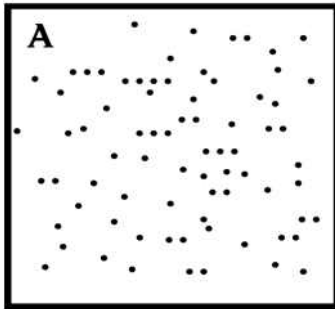


그림 2.15 해양 황갈조류(a, b, c, d, f, g, h, k, l) 및 규질편모조류(e, i, j, m, n). (a) *Ochromonas*, 3~10 μ m, (b) *Pseudokephyryon*, 세포 5~7 μ m, 갑각 9~11 μ m, (c) *Bicosoeca*, 세포 4~6 μ m, 갑각 10~30 μ m, (d) *Paraphysomonas*, 2~20 μ m, (e) *Apedinella*, 7.5~10 μ m, (f) *Meringosphaera*, 4~9 μ m, (g) *Kephyryon*, 세포 5 μ m, 갑각 4.5~18 μ m, (h) *Calycomonas*, 세포 3~8 μ m, 갑각 4~15 μ m, (i) *Pseudopedinella*, 3.5~8 μ m, (j) *Parapedinella*, 7~15 μ m + 방사족, (k) *Dinobryon*, 세포 7~11 μ m, 갑각 19~64 μ m, (l) *Chromulina*, 3~10 μ m, (m) *Actinomonas*, 6~9 μ m + 방사족, (n) *Dictyocha*, 10~45 μ m + 골침

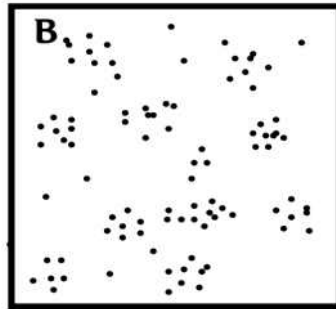
2. 채집과 처리

2.1 채집과 농축

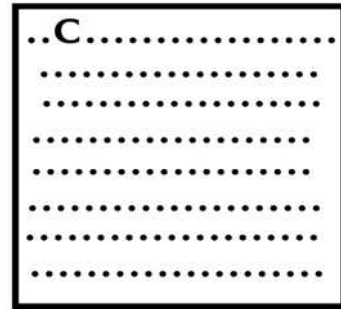
- 정성채집 : 무엇이 있는지? 상대적으로 무엇이 많은지?
- 정량채집 : 단위 부피, 혹은 면적안에 얼마나 있는지?
단위 : 000/○○○,



random distribution

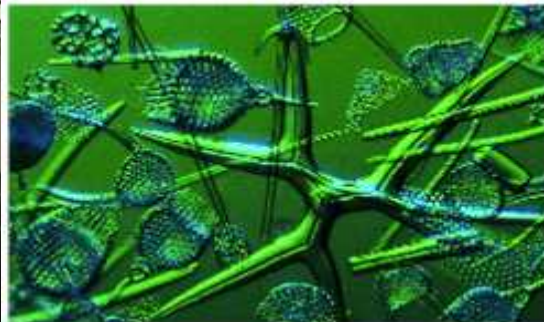


patchy distribution



even distribution

- 농축과 단종 배양
- 실험실 계수



2.2 고정, 보존, 관찰
- 고정과 보존

표 2.7 고정액의 성분 및 사용법

고정액 명칭	성분	사용법
산성 포르말린	40% HCHO와 100% 초산(acetic acid) 같은 부피씩 섞음	망 채집시료 70ml에 20ml; 100ml 해수시료에 2ml(=0.4% HCHO)
알카리성 포르말린	40% HCHO와 증류수를 같은 부피씩 섞음; 용액 1l에 헥사민 100g 넣음	망 채집시료 70ml에 20ml; 100ml 해수시료에 2ml(=0.4% HCHO)
루골용액(Lugol's solution)	증류수 1l에 KI 100g, I ₂ 50g, 빙초산 100ml 순으로 녹임	해수시료 100ml에 0.2~0.4ml; 망 채집시료에는 담갈색이 되도록 넣어 줌

- 세척 관찰

표 2.8 규각세척법

세척법	과정	참고
von Stosch법	시료를 매우 농축하고, HNO ₃ 등량, H ₂ SO ₄ 3배량을 넣고 3분간 끓인 후 세척, 산 제거	신속한 방법
Simonsen법	시료를 증류수 세척 후 동량의 KMnO ₄ 첨가/진탕/하루 방치. 동량의 HCl 넣고 가열 후 세척	보다 시간이 소요되나, 더 좋은 방법임
아세톤, pancreatin 효소법	아세톤: 물(3:1) 용액 처리. pH 7.6, 40°C의 2.5~5% pancreatin 용액에서 3일간 침지	매우 좋은 방법이나, 시간과 노력이 필요함

- 고굴절 수지

표 2.9 광학현미경 관찰을 위한 고굴절 수지

수지명	굴절률	용매	생산자
Clearax	1.67	Xylene, acetone	G.T. Gurr
Naphrax	1.72	Xylene, toluene, acetone	Northern Biological Supplies
Pleurax	1.74	Alcohol	(von Stosch, 1974 참조)

표 2.10 계속

	Cyanobacteria	Chlorophyta	Xanthophyta	Chrysophyta	Bacillariophyta	Cryptophyta	Dinophyta	Euglenophyta	Prasinophyta	Haptophyta
Flavoxanthin		+								
Violaxanthin		+	+	+						+
Neoxanthin		+	+					+		
Alloxanthin						+				
Monodoxanthin						+				
Crocoxanthin						+				
Siphonoxanthin										+
Myxoxanthophyll	+									+
Myxanthin	+									
Anthraxanthin	?									
Astaxanthin		+						+		
Oscilloxanthin	+									
Echinenone	+							+		
Phycocyanins	+					+				
Phycocerythrins	+					+				
Others		+	+			+	+		many	+

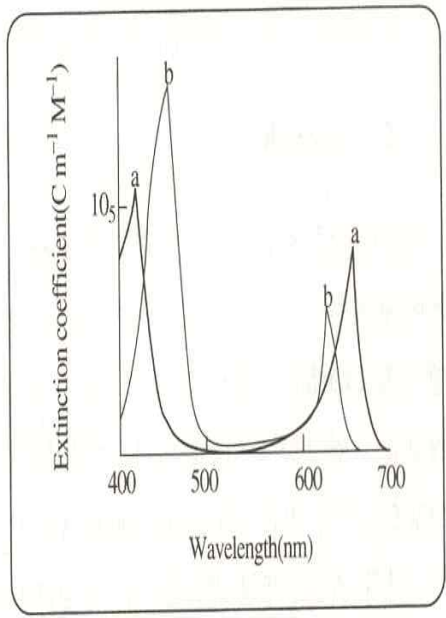


그림 2.23 Chlorophyll a와 b의 흡수스펙트럼

표 2.11 90%의 아세톤에 추출된 엽록소 및 카로티노이드 색소의 흡수계수 (Richard and Thompson, 1950)

색소	파장 (mm)	655	645	630	510	480	450	420
Chlorophyll a		66.7	16.4	11.9	2.6	1.9	8.9	70.7
Chlorophyll b		6.5	45.6	12.7	3.5	13.6	54.0	26.8
Chlorophyll c		1.1	4.4	10.4	2.1	5.4	78.5	37.3
β -carotene		0	0	0	45.3	293	224	148
Fucoxanthin		0	0	0	45.6	203	249	169
Astacin-type pigment		0	0	0	169	249	221	147
Non-astacin type pigment		0	0	0	45	203	246	171

* Carotenoid

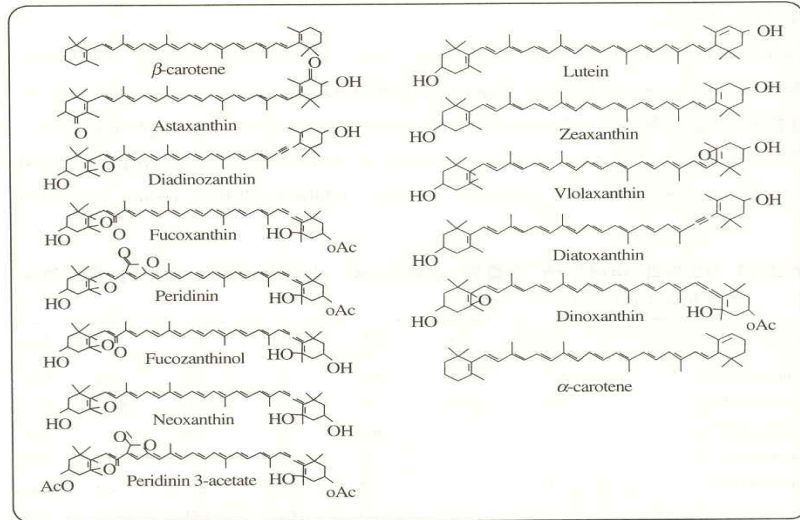


그림 2.24 카로틴계열 색소들의 구조식

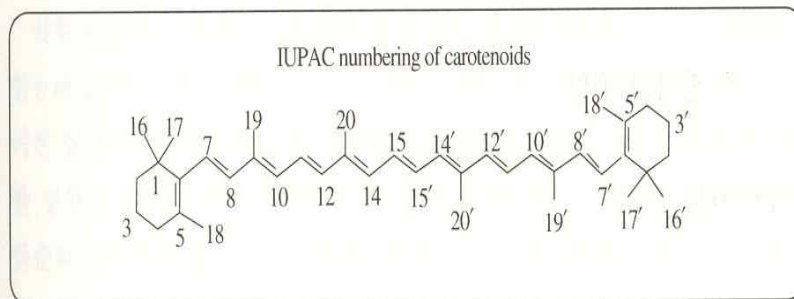


그림 2.25 카로티노이드의 IUPAC 번호매김

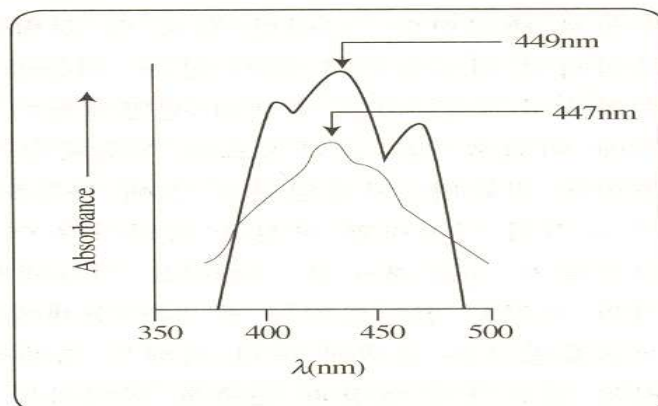


그림 2.26 카로틴계열 색소의 흡수스펙트럼

4. 성장과 배양

4.2 배양의 형태 : 일괄배양 vs. 연속배양

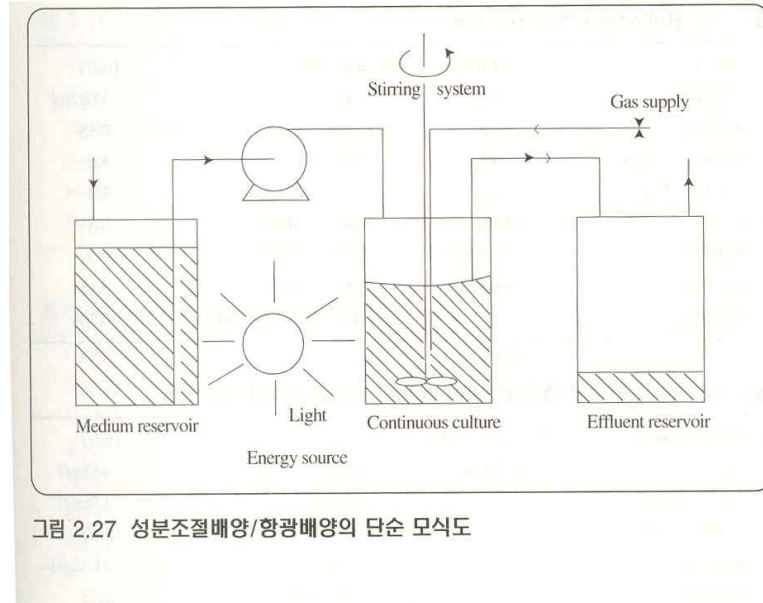


표 2.17 Woods Hole MBL pH 7.3

a. Macronutrients	1ml each/l
CaCl ₂ · 2H ₂ O	36.76g/l
MgSO ₄ · 7H ₂ O	36.97
NaHCO ₃	12.60
K ₂ HPO ₄	8.71
NaNO ₃	85.01
Na ₂ SiO ₃ · 9H ₂ O	28.42
b. Micronutrients	1ml each/l
Na ₂ · EDTA	4.36g/l
FeCl ₃ · 6H ₂ O	3.15
CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.01
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0.022
CoCl ₂ · 6H ₂ O	0.01
MnCl ₂ · 4H ₂ O	0.18
Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	0.006
c. Vitamins	
Thiamine · HCl	0.1mg/l
Biotin	0.5μg/l
Cyanocobalamin	0.5μg/l
d. Tris-use	2ml/l
Tris(hydroxymethyl)-aminomethane	50g/200ml
HCl로 pH를 7.2로 조정	

** 배양에서의 성장

준비단계, 기하급수적 성장단계, 상대적 성장감소단계, 성장정지단계, 사망단계

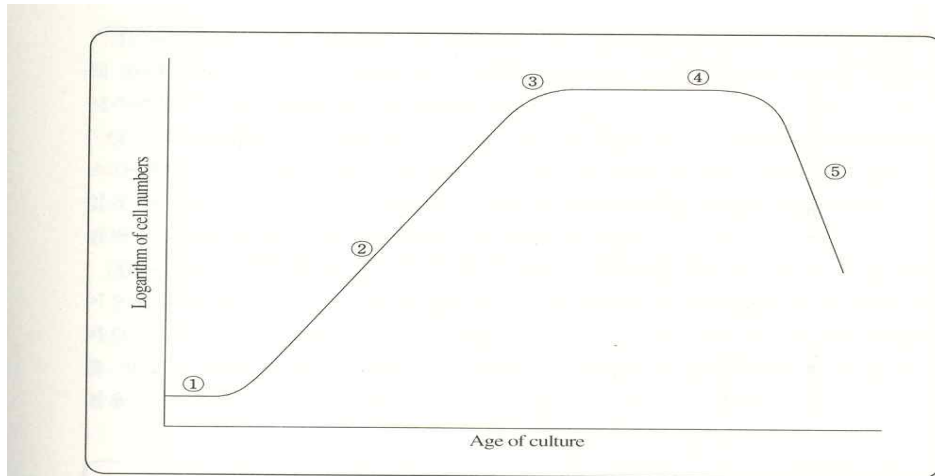


그림 2.28 제한된 배양액 용적 내에서 단세포 조류가 나타내는 성장특성유형.
 ① 잠복기, ② 지수성장기, ③ 상대성장률 감소기, ④ 정지기, ⑤ 사멸기

** 성장률과 기질 농도

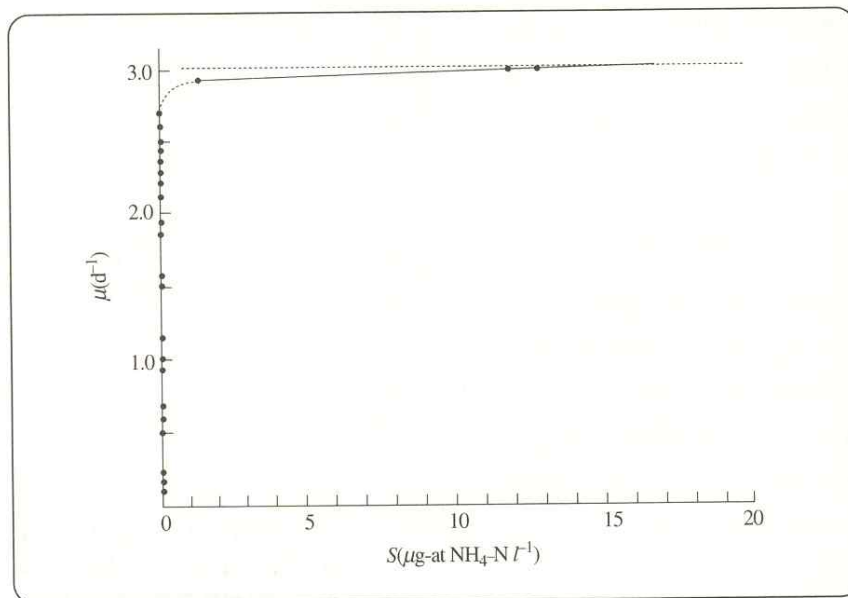


그림 2.33 암모늄 이온농도의 함수로서의 *Thalassiosira pseudonana*(3-H)의 평형상태 성장률(μ)

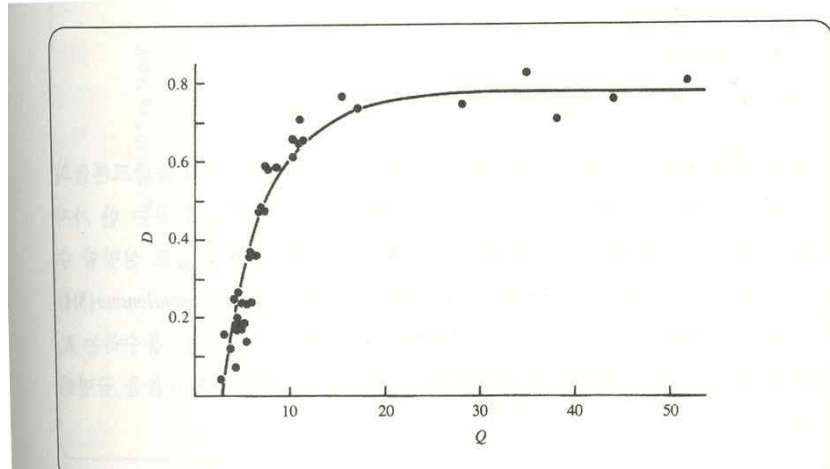


그림 2.34 비타민 B₁₂ 제한 성분조절배양에서의 *Pavlova*(*Monochrysis*) *lutheri*: 희석률(D)과 세포함량(Q)과의 관계

** 서로 다른 영양염 비율에서 성장

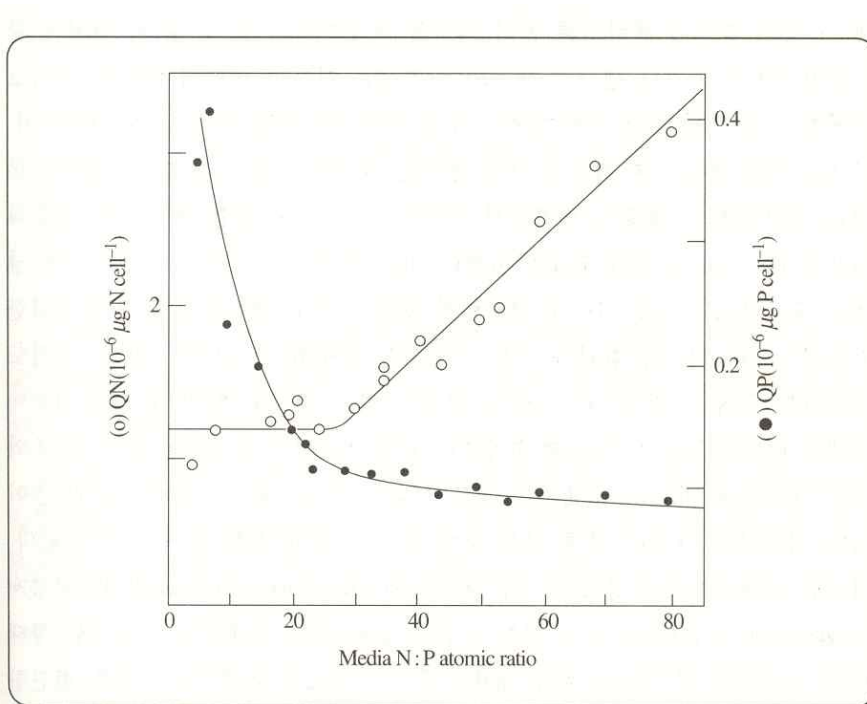


그림 2.35 유입 배양액 내의 질소 : 인 영양염 비율 다르게 하고, *Scenedesmus* sp.를 배양하여 평형상태에 성장에 이른 다음 측정된 질소와 인의 세포 함량

5. 광합성과 1차생산

5.1 광합성

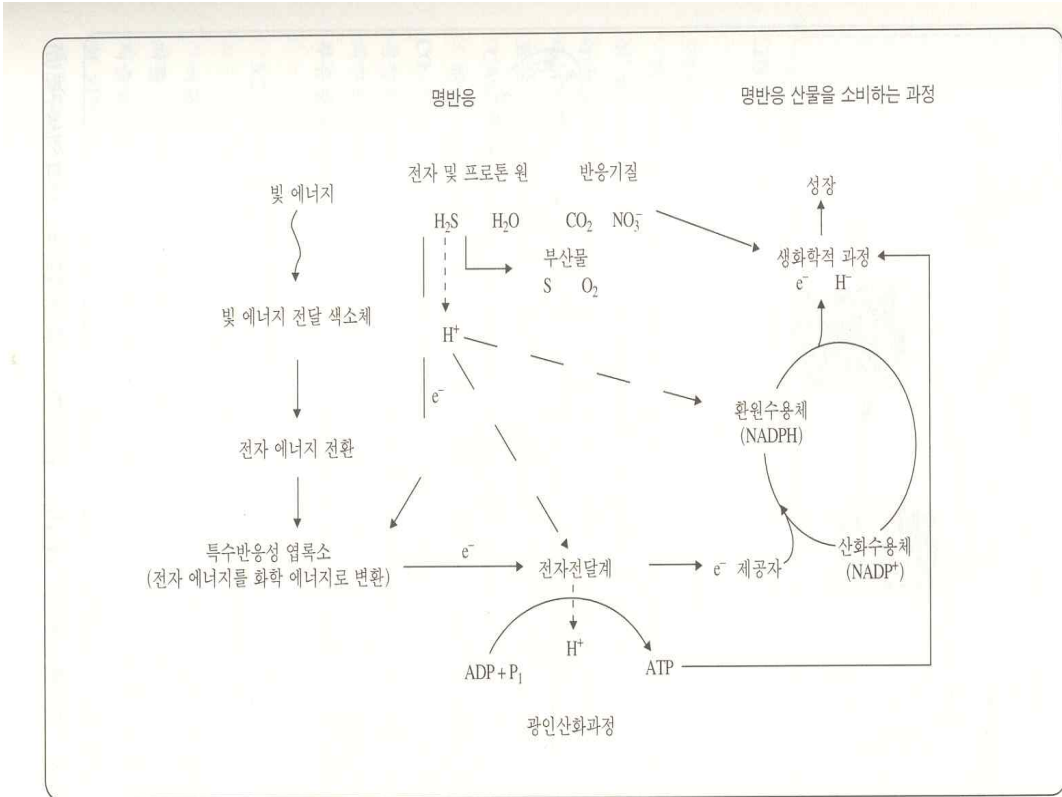


그림 2.36 광합성 개요도

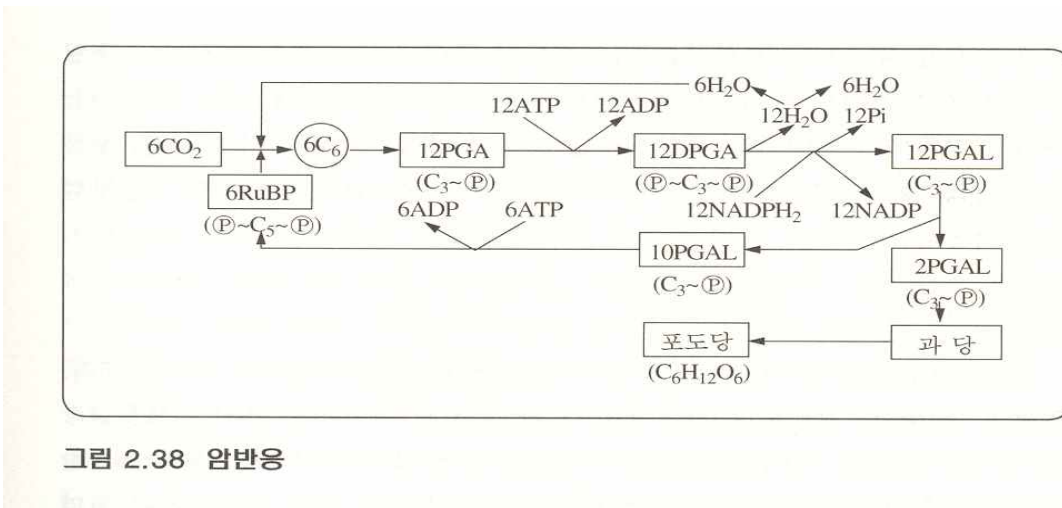


그림 2.38 암반응

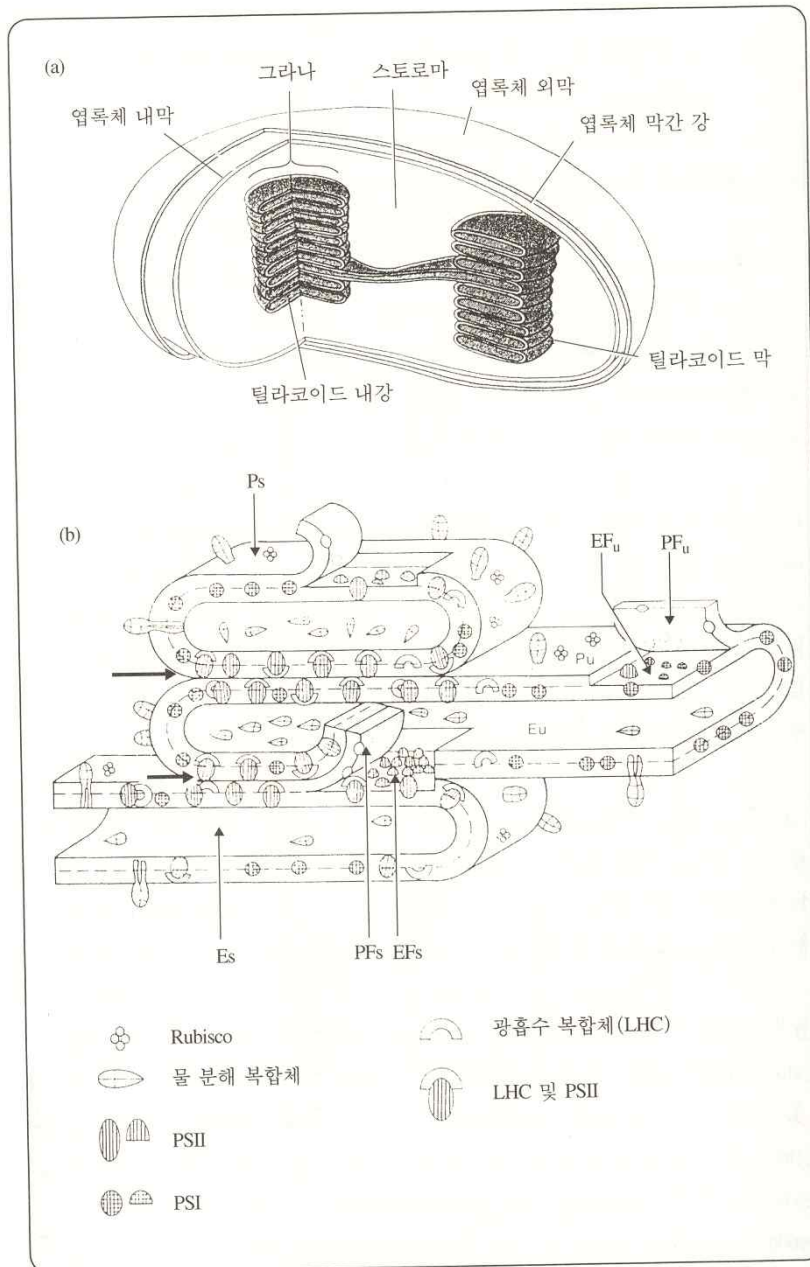


그림 2.37 진핵세포 생물의 엽록체의 구조모형(a) 및 틸라코이드 막의 미세구조(b)

5.2 1차생산

- 광합성과 1차생산의 차이
- 단위의 선택 : 시간과 공간에서
 - 시간 : hour, day, month, year 중 day 와 year
 - 공간 : 체적 보다는 면적

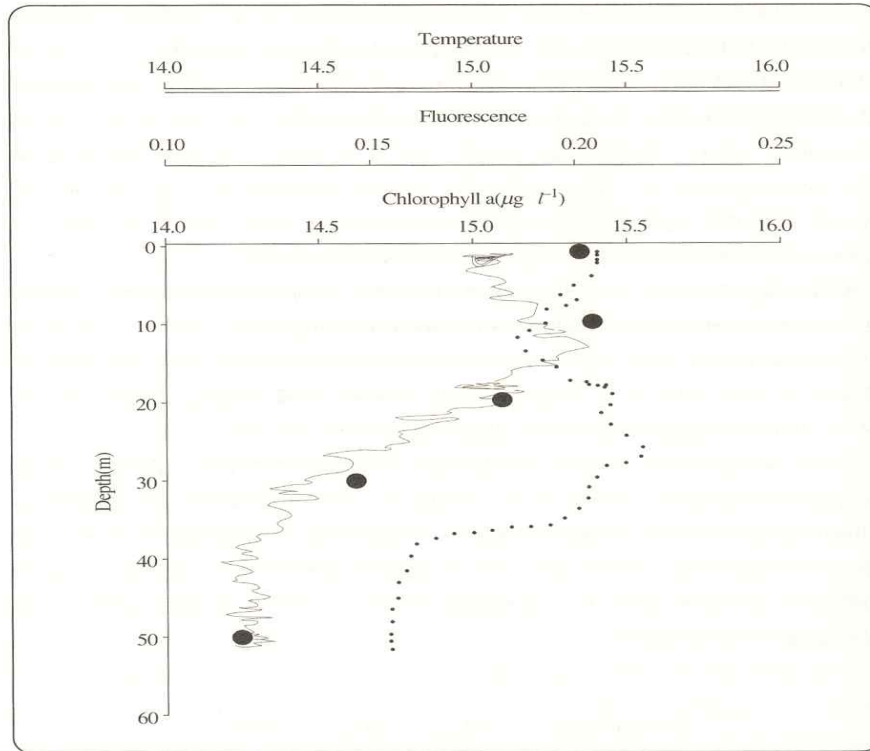


그림 2.39 황해의 한 정점에서 관측된 수중 형광계에 의한 엽록소, 수온, 형광의 수직구조(유, 미발표 자료)

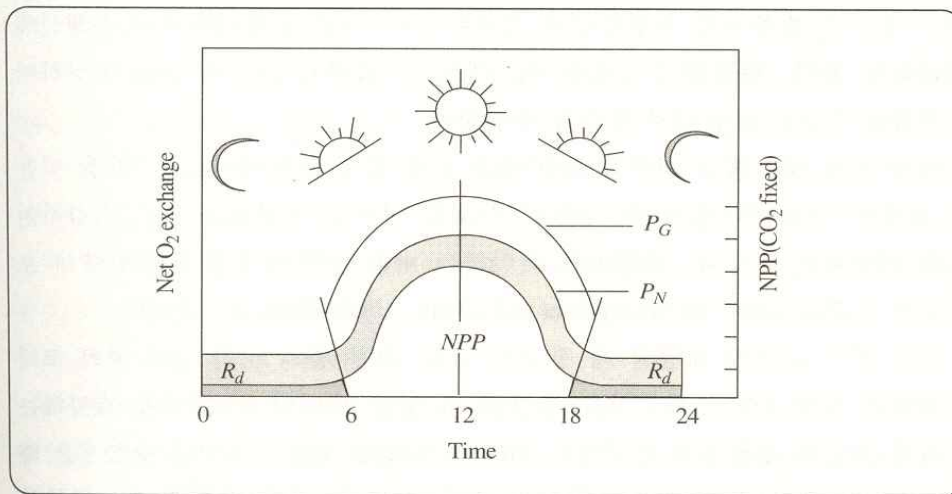


그림 2.40 하루 동안의 총광합성(P_G), 순광합성(P_N), 순일차 생산(NPP)의 관계. 밤(검은 부분으로 표시) 동안의 호흡에 의해 산소의 순소비가 일어난다. 순광합성에 낮 동안의 호흡을 더한 것이 총광합성이고, 밤 동안의 호흡을 뺀 것이 순일차 생산이다(Falkowski and Raven, 1997).

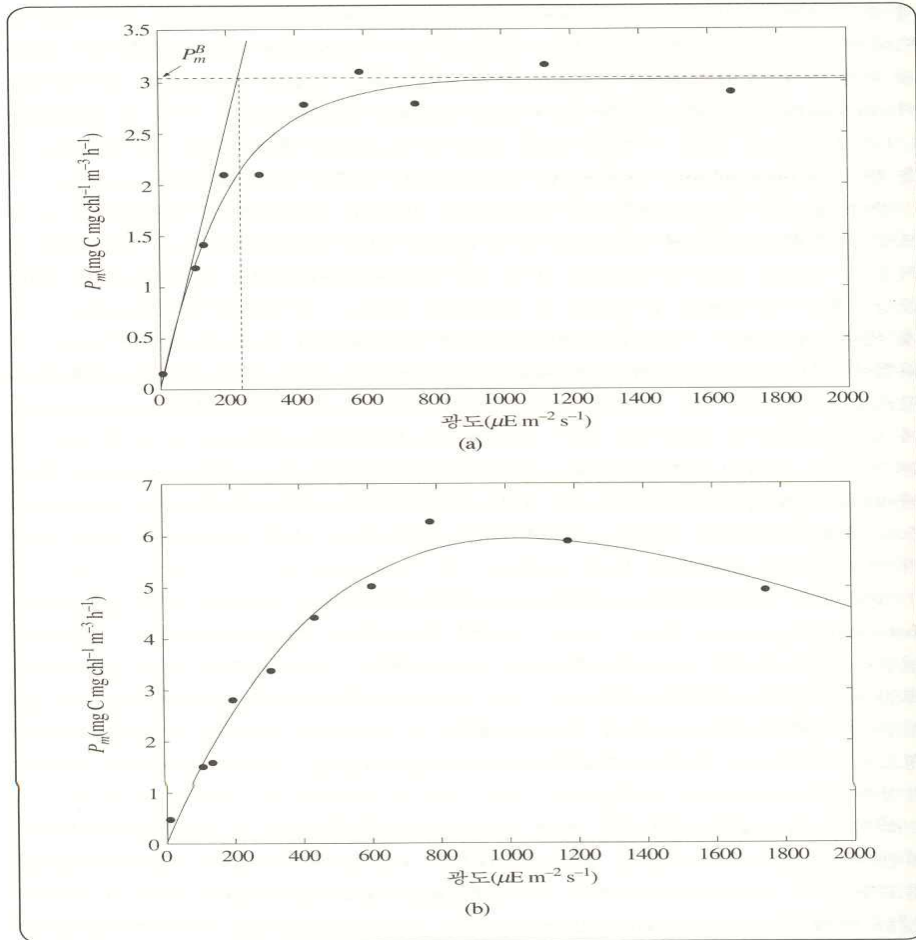


그림 2.41 태안반도 연안에서 측정된 P-I 곡선(유와 신, 1995). (a) 광저해가 없는 경우. (b) 광저해가 있는 경우. 광도의 증가에 따라 동화수가 감소한다.

표 2.18 흔히 쓰이는 광합성 모형 (Falkowski and Raven, 1997)

$P = P_m \left(\frac{\alpha E}{P_m + \alpha E} \right)$	직각쌍곡선
$P = P_m \left(\frac{\alpha E}{\sqrt{P_m^2 + (\alpha E)^2}} \right)$	이차함수
$P = P_m \left(1 - e^{-\alpha E / P_m} \right)$	지수함수
$P = P_m \left(1 - e^{-\sigma_{PSII} \cdot \tau \cdot E} \right)$	지수함수
$P = P_m \tanh \left(\frac{\alpha E}{P_m} \right)$	쌍곡탄젠트

$$\alpha^B = a^O \phi_m = n \sigma_{PSII}$$

$$P_m^B = \frac{n}{\tau}$$

6. 1차생산을 좌우하는 요인들

6.1 빛

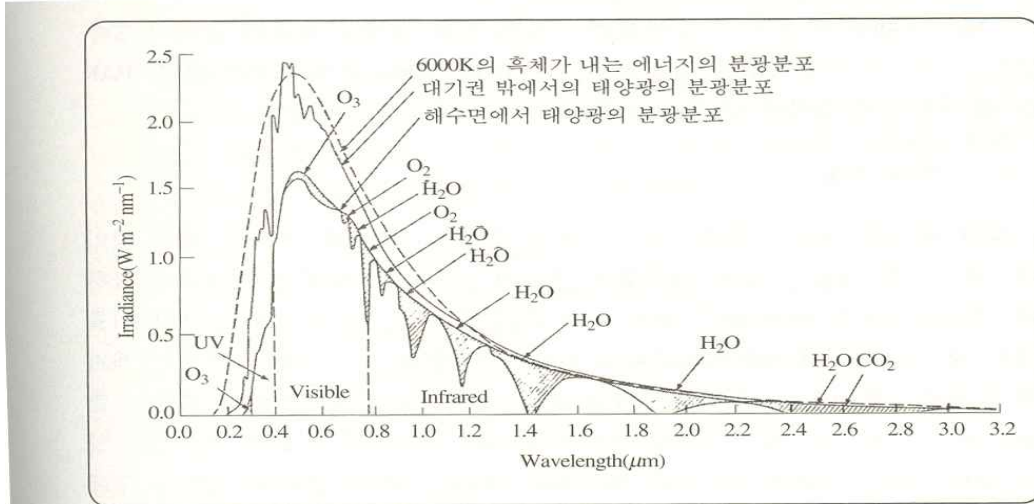


그림 2.45 태양 복사 에너지의 분광분포. 대기권 밖에서와 해수면에서의 복사 에너지 분포와 6000K 흑체의 복사 에너지 분포를 비교하였다(Kirk, 1994).

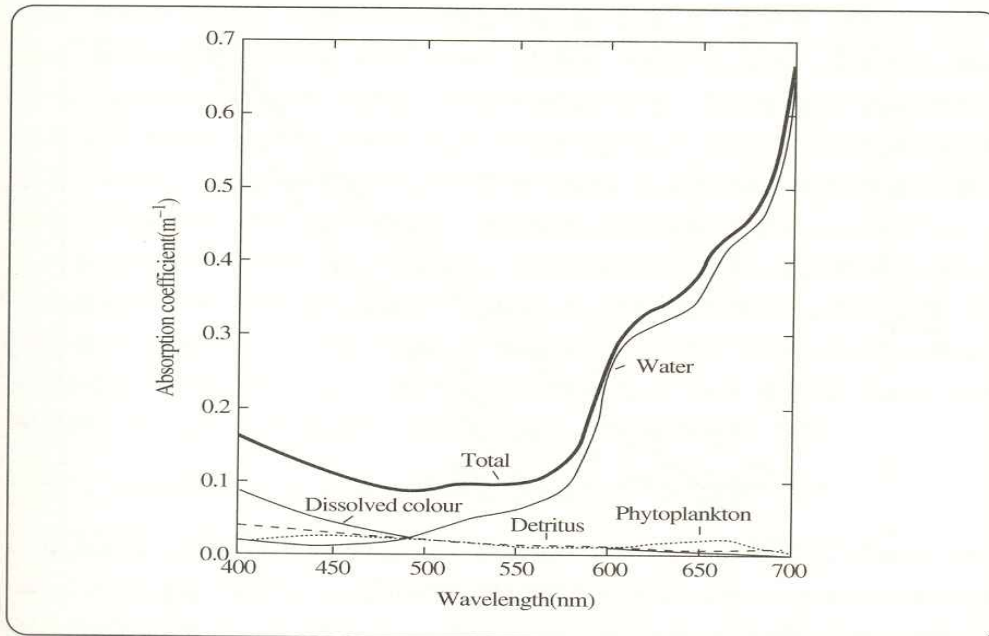


그림 2.46 생산적인(엽록소 a 농도 1mg m^{-3}) 원양 해수의 흡광계수(Kirk, 1994). 각 구성성분에 의한 흡광계수도 함께 표시하였다.

6.2 수온

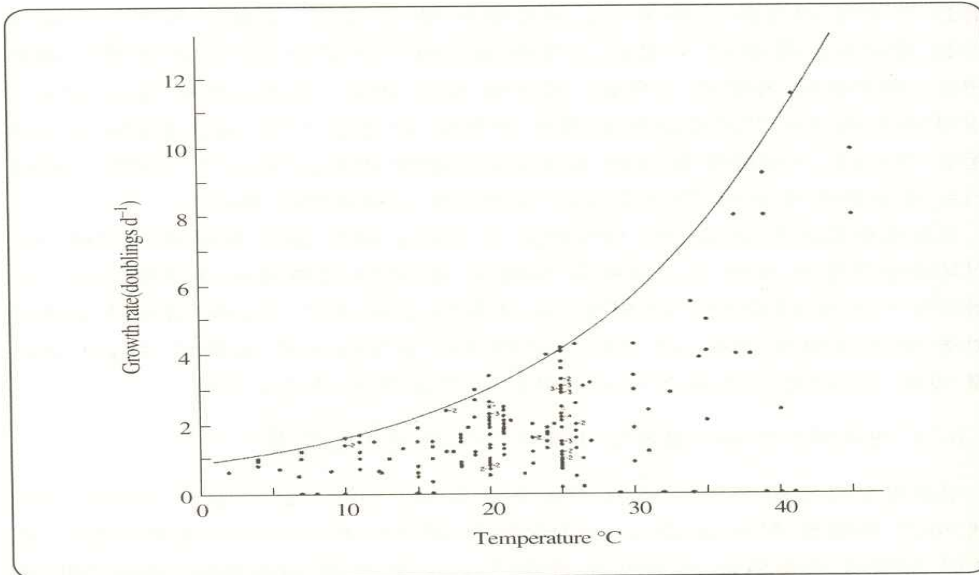


그림 2.48 비연속배양에 의한 담수·해수 조류의 상대성장률에 대한 온도의 영향

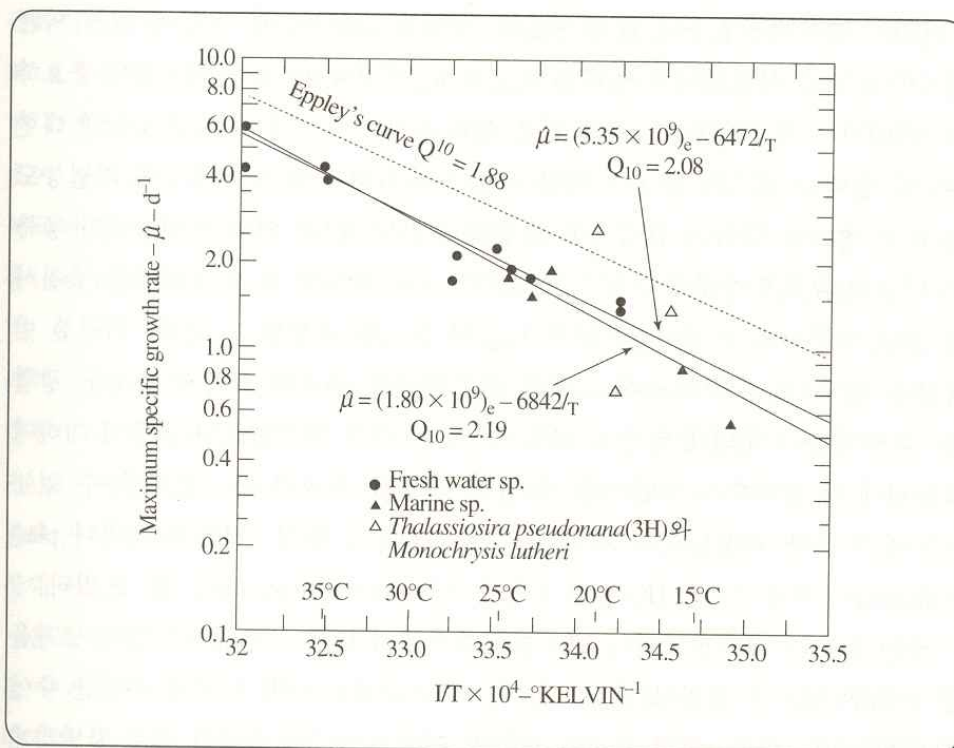


그림 2.49 연속배양에 의한 담수·해수 조류의 상대성장률에 대한 온도의 영향

6.3 영양염

표 2.20 각 원소의 식물플랑크톤 생체농도와 표층해수 평균농도와의 비율 (Millero and Sohn, 1992)

원소	식물플랑크톤의 생체농도 ($\mu\text{g}/100\text{mg}$ 건중량)	표층해수의 평균농도 ($\mu\text{g}/\text{l}$)	해수농도/생체농도 비율
N	5	0.3	0.06
P	0.6	0.03	0.05
Si	10	0.5	0.05
C	30	28	0.9
O	47	90	1.9
Mg	0.4	1,300	3,250
S	1	900	900
Ca	0.5	420	840

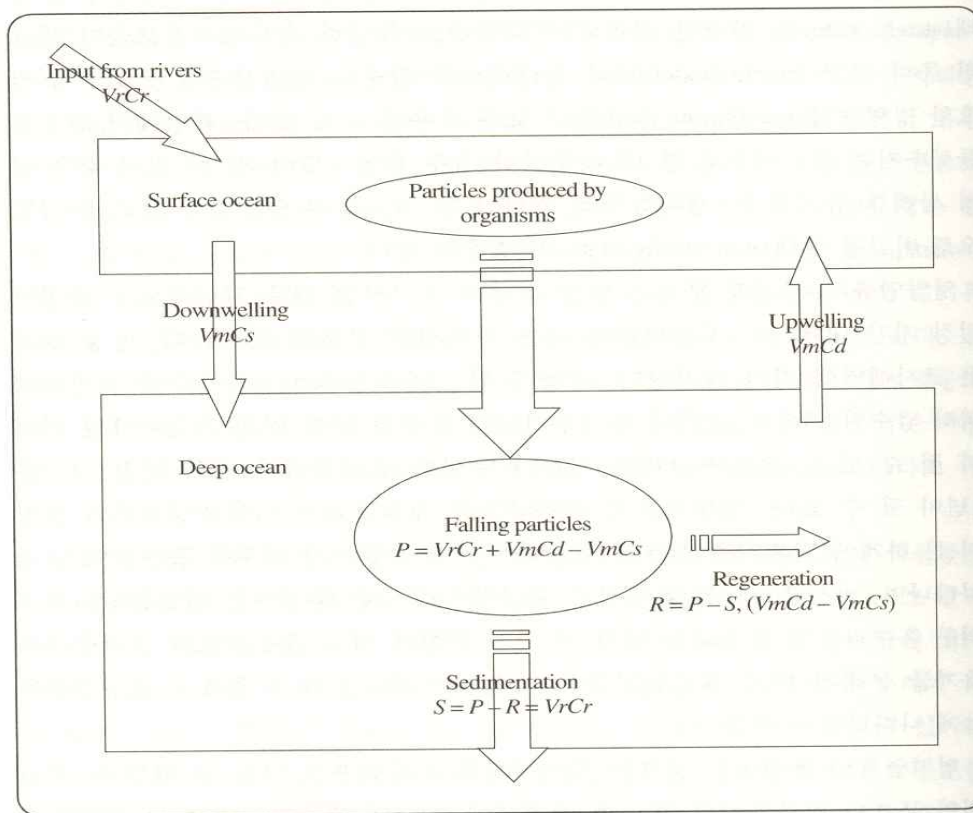


그림 2.51 진생물원소의 주요 플럭스(유입 및 제거속도)를 보여 주는 상자모델 (from Broecker, 1974). V_r : 하천유입속도, V_m : 해양의 수직혼합속도(V_r 의 20배), C_r : 하천의 원소농도, C_s : 표층의 원소농도, C_d : 저층의 원소농도, P : 저층으로의 입자체 침강플럭스, R : 저층의 재생산플럭스, S : 퇴적플럭스

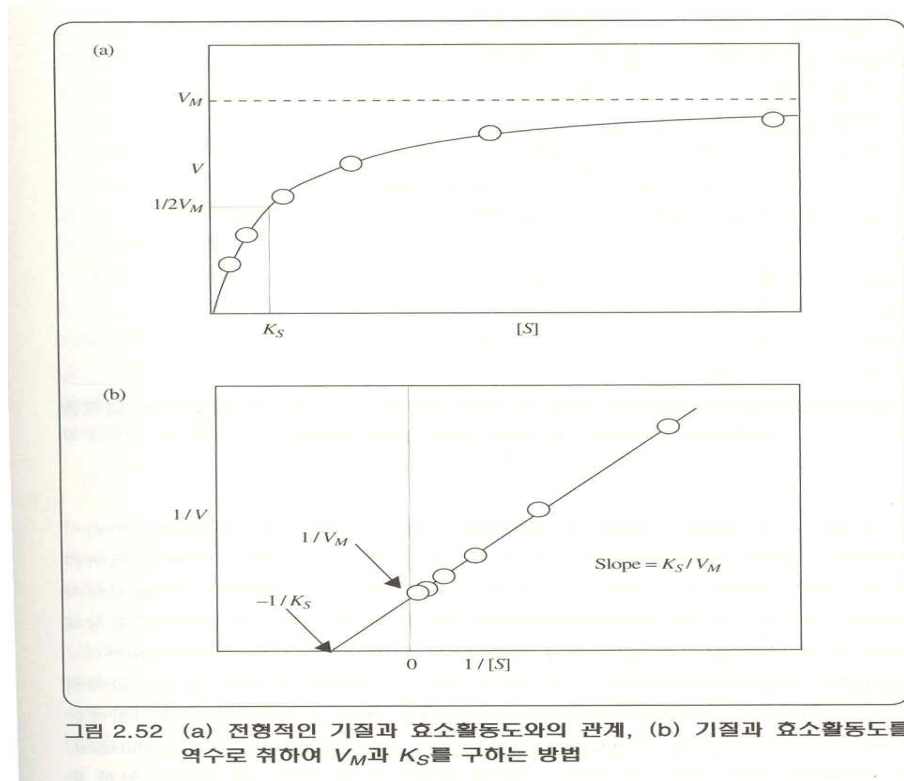


그림 2.52 (a) 전형적인 기질과 효소활동도와의 관계, (b) 기질과 효소활동도를 역수로 취하여 V_M 과 K_S 를 구하는 방법

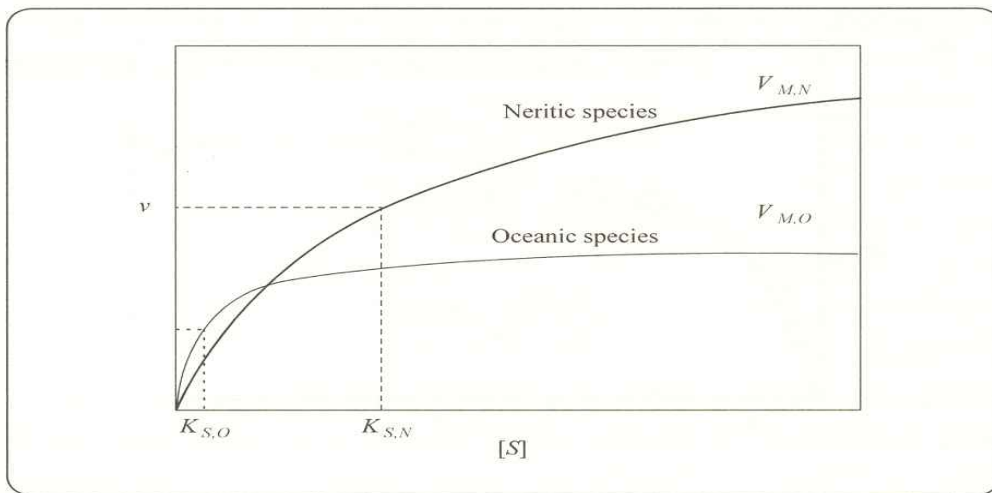


그림 2.53 가용 영양염류의 농도에 따른 연안종(neritic species)과 대양종(oceanic species)의 성장속도의 생리적 적응. $V_{M,N}$, $K_{S,N}$: 연안종의 V_M 와 K_S , $V_{M,O}$, $K_{S,O}$: 대양종의 V_M 와 K_S

6.4 미량원소

6.5 동물플랑크톤의 섭식

