

해양한국발전프로그램(KSGP)연구개발사업
연 구 보 고 서

지속가능한 친 환경 해조 복합양식 시스템 개발

(Development of sustainable seaweed integrated aquaculture system)

2005. 6. .

부산대학교 SG연구사업단

해 양 수 산 부

제 출 문

해양수산부 장관 귀하

본 보고서를 “지속가능한 친 환경 해조 복합양식 시스템 개발”

과제의 최종보고서로 제출합니다.

2005 년 6 월 일

대학(교)명 : 부 산 대 학 교
사업단장 : 이 승 건
연구팀장 : 이 춘 환
참여교수 : 정 익 교

요 약 문

본 연구는 사료 공급형 (어류) 양식과 영양염 추출형 (해조) 양식을 복합하여 환경 친화적이며 지속 가능한 해조 복합 양식시스템을 개발하여 연안의 부영양화와 양식장 주변의 자가 오염에 대한 저감대책을 마련하는 방안으로 기획되어 2년 동안 단계적으로 현장과 실험실에서 양식장 형태화 규모에 따라 순차적으로 수행되었다.

해조 종의 선발을 위해 기존의 양식 종과 야생종 들의 영양염(암모니움) 흡수 능력을 조사한 결과 *Porphyra* sp., *Laminaria* sp., *Undaria* sp., *Enteromorpha* sp. 와 *Gracilaria* sp. 등의 양식종 들이 적합하였다. 해조의 생육이 부진한 여름철에 적용할 대상 종으로는 *Ulva* sp., *Gracilaria* sp. 와 *Codium fragile* 등을 조사하였다.

선정된 해조 종을 대상으로 중규모 수조에서 폐쇄 순환식 또는 유수식 시스템에 적용한 실험에서 적용한 규모와 기간 동안에는 해조의 영양염의 흡수 능력과 수질이 양호하게 유지되었다. 이러한 과정을 Stella 모델을 활용하여 간단하고 사용이 간편한 모델을 만들어 해조의 특성과 생육, 수확 등을 변수로 모의 예측 실험도 수행하였다.

해상 가두리 양식장에서는 경험적으로 이미 어류, 패류, 해조류를 복합한 양식이 무허가로 수행되고 있었다. 조사 대상 해역인 여수 돌산도 주변의 수질은 양호하였으며 추후 생태계 모델링이 계획된 곳으로 지속적인 연구가 필요한 곳이다.

본 연구는 최근 전 지구적으로 진행되고 있는 '균형양식'의 추세를 매우 적절하게 반영하고 있으며 'Ecosystem Based Management'의 총괄적인 개념을 기초로 필수적으로 수행될 수밖에 없는 실정이다. 우리나라에서도 이러한 추세를 적극적으로 홍보하여 정책과 실행방안에 반영하여 추진하는 것이 바람직하다.

I. 과제명

환경 친화적 복합양식 시스템 개발

II. 연구개발의 목적과 필요성

연안의 부영양화와 양식장 주변의 자가오염에 대한 저감대책을 마련하기 위해 해조를 이용한 복합양식 시스템 개발하고, 이를 양식 현장에 적용하는 방안을 양식의 형태와 규모별로 육상 수조식 양식 시스템에서 해상 가두리 양식장으로 순차적으로 개발하고자 하였다.

III. 연구개발의 내용과 범위

복합양식에 적용할 해조 종을 선별하고, 이들의 생육, 생리 특성을 연구하였다. 선별된 해조 종을 대상으로 양식 현장에 적용하는 방안을 각 단계별로 육상 수조 양식장과 해상 가두리 양식장에서 모색하였다. 현장에서 조사된 자료를 바탕으로 양식 시스템에 적용할 수 있는 수치 모델의 개발은 간편한 스텔라 모델을 활용하여 모의 예측 실험을 실시하였다.

IV. 연구개발결과와 활용계획

현재 보편적으로 양식되고 있는 해조 종(김, 파래, 다시마, 미역 등) 들의 영양염 흡수와 생육 특성이 양호하여 복합양식 대상 종으로 선별하였다. 이들을 소규모 어류 수조와 해조 수조를 복합한 폐쇄 순환 시스템을 만들어 효능을 조사하였다. 실험 규모와 기간 동안 조사한 결과에서 도출된 자료로 Stellar 프로그램을 이용하여 적용한 결과 만족할 만한 해조류의 수확과 여과 효율이 예상되었다.

이러한 연구 동향은 최근 전 지구적으로 진행되고 있는 '책임어업'과 '균형양식' 등의 추세를 매우 적절하게 반영하고 있어 시의 적절한 연구이며, 또한 현재 학계(WAS)와 정부간 협력(FAO, PICES, ICES)에서 추진되고 있는

'Ecosystem Based Management' 에서도 환경 친화적이고 지속가능한 해조 복합 양식 시스템이 활용되어야만 한다.

V. 기대효과

환경에 대한 의식이 고조되면서 양식업은 살아남기 위해 최선의 방안을 모색하여야 한다. 즉 양식 생산이 환경 친화적으로 수행되어야 하고 경제적으로도 이득이 남아야 한다. 따라서 추출양식의 대표적인 형태인 해조 양식을 사료 공급형 양식과 묶어 실행하는 것은 선택이 아니라 다른 방도가 없는 유일한 방안이다. 본 연구는 이러한 개념에 대한 홍보와 연안 양식 산업의 미래를 위해 지속적으로 수행되어야 한다.

S U M M A R Y

The present project has been initiated to develop the environmentally friendly and sustainable mariculture system. With the integration and balancing of the extractive (seaweed) and feed (finfish) cultures based on the ecological concepts of trophic dynamics, which could mitigate the cultural eutrophication and the self-pollution of aquaculture in the coastal area. The research was done for two years in the laboratory, aquaculture inland tanks and net-pen grounds and conducted in the proper scale by step-wise manner.

The local seaweed cultivar species such as *Porphyra* sp., *Laminaria* sp., *Undaria* sp., *Enteromorpha* sp. and *Gracilaria* sp. are proven to be good candidates for the culture system in terms of their ammonium uptake capability. Generally seaweeds do not grow well in the summer in Korea, so it is critical to select the summer species for the year around operation of this system. Several summer species such as *Ulva* sp., *Gracilaria* sp. and *Codium fragile* were reasonably suitable for the summer operation. The application of this system to the closed inland tank culture system was feasible under the scale of tanks and duration tested. The final step in the net pen culture system should be the integration of finfish-shellfish-seaweed cultures, which have been already in practice for years without license. Therefore, it is required to make new legislation of this culture practice in the near future. To expedite the understanding of this system, several end-user easy models were developed with Stella at each step.

The present research reflects the emerging need of the balanced ecosystem approaches for the mariculture and this would be incorporated and managed under the 'Ecosystem Based Management'. Therefore, the immediate application of the environmentally friendly and sustainable mariculture system should be recommended and the follow-up researches are also recommended.

I. Title

The development of environmentally sound integrated polyculture system

II. The purpose and significance

The present project has been initiated to develop the environmentally friendly and sustainable mariculture system. With the integration and balancing of the extractive (seaweed) and feed (finfish) cultures based on the ecological concepts of trophic dynamics, which could mitigate the cultural eutrophication and the self-pollution of aquaculture in the coastal area.

III. Research plan: research design, materials and methods

The research was done for two years in the laboratory, aquaculture inland tanks and net-pen grounds and conducted in the proper scale by step-wise manner.

The local seaweed cultivar species such as *Porphyra* sp., *Laminaria* sp., *Undaria* sp., *Enteromorpha* sp. and *Gracilaria* sp. were tested in terms of their ammonium uptake capability. It is critical to select the summer species for the year around operation of this system and several summer species such as *Ulva* sp., *Gracilaria* sp. and *Codium fragile* were examined. The application of this system to the closed inland tank culture system and the net pen culture system was initiated for the practical operation. To expedite the understanding of this system, several end-user easy models were developed with Stella at each step.

IV. Attained results and future plan

The local seaweed cultivar species such as *Porphyra* sp., *Laminaria* sp., *Undaria* sp., *Enteromorpha* sp. and *Gracilaria* sp. are proven to be good candidates for the culture system in terms of their ammonium uptake capability. Generally seaweeds do not grow well in the summer in Korea, so it is critical to select the summer species for

the year around operation of this system. Several summer species such as *Ulva* sp., *Gracilaria* sp. and *Codium fragile* were reasonably suitable for the summer operation. The application of this system to the closed inland tank culture system was feasible under the scale of tanks and duration tested. The final step in the net pen culture system should be the integration of finfish-shellfish-seaweed cultures, which have been already in practice for years without license. Therefore, it is required to make new legislation of this culture practice in the near future. To expedite the understanding of this system, several end-user easy models were developed with Stella at each step. Based on the model, the harvest and filtration efficiencies were feasible in this system.

V. Future prospects

The present research reflects the emerging need of the balanced ecosystem approaches for the mariculture and this would be incorporated and managed under the 'Ecosystem Based Management'. Therefore, the immediate application of the environmentally friendly and sustainable mariculture system should be recommended and the follow-up researches are also recommended. Moreover, the establishment of the multi-lateral cooperation among nations - Korea, China, Japan and USA - is recommended as soon as possible.

CONTENTS

Statement of submission	1
Summary in Korean	2
Summary in English	5
Contents in English	8
Contents in Korean	10
Chapter 1 Introduction	12
1.1 Objective (original proposal)	13
1.2 Significance	13
Chapter 2 Current status of related technology	15
2.1 Domestic status	15
2.2 Status in other countries	16
Chapter 3 Research contents and results	22
3.1 Materials and methods	22
3.1.1 Baseline studies: Selection of suitable species	22
3.1.1.1 Physiology and growth study	22
3.1.1.2 Phenology and application study	25
3.1.2 1st stage application: mid-scale study	26
3.1.2.1 Physiology and growth study	26
3.1.2.2 Phenology and application with modelling	30
3.1.2.3 Pilot scale trial	30

3.2 Results and discussion	30
3.2.1 Baseline studies: species selection	30
3.2.1.1 Physiology and growth study	30
3.2.1.2 Phenology and application	49
© Additional study for summer species	64
3.2.2 Application study for mid-size system	69
3.2.2.1 Physiology and growth study	69
3.2.2.2 Phenology and growth study with modelling	81
3.2.2.3 Pilot scale study for land tank and net pen system	81
Chapter 4 Achievement and its contribution	84
4.1 Achievement in the research object	84
4.1.1 Achievement in the research contents	84
4.1.2 Self evaluation on the achievement	85
4.2 Contribution	86
Chapter 5 Future plan	87
5.1 Application of results	87
Chapter 6 References	89

목 차

제 출 문	1
요 약 문	2
Summary	5
Contents	8
목 차	10
제 1 장 서 론	12
제 1 절 연구의 목적 (당초 연구계획서 내용)	13
제 2 절 연구의 필요성	13
제 2 장 국내외 연구개발 현황	15
제 1 절 국내 연구 개발 현황	15
제 2 절 국외 연구 개발 현황	16
제 3 장 연구개발 수행내용과 결과	22
제 1 절 연구내용과 방법	22
1. 기반 조성단계: 종 선별 기술 개발	22
(가) 대상 해조 종의 생리, 생육 특성 연구	22
(나) 대상 해조 종의 생활사에 따른 생식 계절 성 연구와 복합양식 시스템 적용 방안 연구	25

2. 초기 적용단계: 선정된 종에 대한 중규모 양식 시스템 적용 연구	26
(가) 대상 해조 종의 중규모 시스템의 생리, 생육 특성 연구	26
(나) 중규모 시스템에서의 대상 종의 생태, 생육 과 운영 시뮬레이션 모델 개발	30
(다) pilot 규모 실험	30
제 2 절 연구결과와 토론	30
1. 기반 조성단계: 종 선별 기술개발	30
(가) 대상 해조 종의 생리, 생육 특성 연구	30
(나) 대상 해조 종의 생활사에 따른 생식 계절 성 연구와 복합양식 시스템 적용 방안 연구	49
◎ 기반 조성단계 추가 실험- 하계 종 선별 기술 개발	64
2. 초기 적용단계: 선정된 종에 대한 중규모 양식 시스템 적용 연구	69
(가) 대상 해조 종의 중규모 시스템의 생리, 생육 특성 연구	69
(나) 중규모 시스템에서의 대상 종의 생태, 생육 과 운영 시뮬레이션 모델 개발	81
(다) 육상 수조 해조 복합양식 시스템과 해상 가두리 양식장 에 해조 복합양식 시스템 적용을 위한 pilot 규모 실험	81
제 4 장 연구개발 목표 달성도와 대외기여도	84
제 1 절 연구개발 목표 달성도	84
1. 연구 내용의 달성도	84
2. 평가의 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가	85
제 2 절 대외 기여도	86
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	87
제 1 절 연구개발 성과 활용 실적	87
제 6 장 참고문헌	89

제 1 장 서 론

현재 지구상의 인구 증가 추세로 볼 때, 소비자가 원하는 수산생물들을 양식하지 않고서는 바다에서 더 이상의 생산을 기대할 수 없다. 또한 인간이 소비하는 새로운 바다식량의 생산은 지속가능한 수산업 관리, 서식처 복원, 친환경적으로 개선된 양식을 통해서만 가능하다.

자연의 수생생태계는 부가되는 영양염을 생물학적이거나 화학적 과정으로 처리하는 고유의 자정 능력을 갖고 있다. 이러한 관점에서 양식에서 배출되는 영양염과 폐기물은 생태계의 다른 종들의 먹이로 이용되어 균형을 이룰 수 있다. 그러나 제대로 관리되지 않은 양식은 환경에 나쁜 영향을 초래한다. 따라서 생태계 기능과 영양염 동화 작용 그리고 새로운 서식처의 생성과 보존으로 양식생산의 균형을 맞추는 것이 본 연구의 핵심 개념이다.

대부분의 어류양식 산업과 다른 인간 활동에서 배출되는 부가적인 영양염은 굴, 조개, 담치, 가리비 등이 속하는 여과식자들의 양식 체제나 해조 양식 종들이 포함된 형태의 양식 생산과 균형을 이루는데 이용될 수 있다. 어류 양식은 다양한 생물 군집이 서식하고 강한 해류가 있거나 규모가 큰 외해역 수괴, 강한 해류가 있는 연안역, 그리고 배출되는 영양염을 재순환 기술로 처리하거나 수집할 수 있는 육상 시설에서 이뤄질 수 있다. 즉 영양염의 동화능력이 있는 곳에서는 가능하다. 양식을 포함한 연안역 통합관리 차원에서 생태계 기능을 유지하기 위해서는 양식장 시설을 적절하게 배치하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 양식과 관련하여 생태계 기반 관리에 필요한 핵심 요인과 변량을 확인하고 연안역 생태계 기능과 더 좋은 수질을 유지하기 위해 양식이 기여할 수 있는 방안에 초점을 맞추어야 한다. 양식이 연안역 통합관리에 포함될 경우, 올바른 결정을 내리기 위해 연안역 관리에 적용한 균형적 생태계 접근 방법과 수치 모델의 필요성에 대한 고려가 필수적으로 수행되어야 한다.

바다 양식에 초점을 맞춘 연안역 생태계 관리에 필요한 보편적인 지도 지침, 바다 양식장을 포함하는 연안역 생태계의 수치모델 개발에 필요한 기초 자료와 변량 분야에 대한 정보와 연안생태계 양식장 부지 선정과 설치 과정에서 연안역 관리자들이 고려해야 될 내용에 본 연구 내용이 우선적으로 고려되어야 한다. 즉 생태계-기반 관리 측면에서 볼 때 생태계 기반 양식장 관리체제의 개발은 이제 겨우 시작 단계이며 또한 이러한 관리 기술의 개발이 계속되어야 한다.

2000년대부터 제시되기 시작한 Ecosystem based management (EBM)가 이제는 거의 모든 분야에 적용되고 있다. 인간 활동의 편익에 따라 구분된 행정구역과 활동 영역에서 인간의 가치가 우선적으로 적용되어 운영되었던 이전의 연안역 통합 관리가 이제는 해당 해역을 하나의 생태계로 설정하고 여기에 포함된 모든 자원을

생태계의 기본원리에 입각하여 관리해야 한다는 것에 대하여 아무도 반론을 제시할 수 없다. 2002년 추쿠바 학회, 2003년 PICES 서울 학회, 5차 APCAB 칭타오 학회, 2005 WAS 하와이 학회 등 모든 학회에서 친환경 양식과 해조양식의 필요성이 여러 나라에서 다양한 분야의 연구팀들에 의해 제시되고 있다.

이미 선진국에서는 정부, 관련 산업계와 학계가 '올인'하여 생태계 기반 연안역 관리의 해결방안을 모색하면서 차세대 연구와 관리를 맡을 인력도 양성하고 있었다. 우리나라의 양식업계와 학계에서도 이를 검토하여 우리 실정에 맞게 개발하여야 한다.

제 1 절 연구의 목적 (당초 연구계획서 내용)

지속 가능한 해조 복합양식 시스템 개발을 위해서는 생물학적인 양식 기술의 발전, 환경 친화적인 양식 시스템과 사회 경제적인 중요성과 수익성이 보장되어야만 가능하다. 따라서 본 연구의 목적은 이 세 분야의 균형 발전을 도모하여 양식 산업의 지속가능성을 확보하는 것이 연구의 궁극적인 목적이다(Fig. 1-1-1).

○ 환경 친화적인 복합 양식기술의 확립

- 대상 종에 대한 기초 생리, 생육 정보를 확보하여 친 환경적인 생산 유지
- 사회 경제적으로 경쟁력이 있는 산업으로 유지할 수 있는 생산기술 개발

○ 친 환경 지속 가능 양식으로의 전환

- 해조 복합양식 시스템을 사료 공급 양식장(Fed aquaculture)과 복합 개발
- 양식장 배출수를 이용하여 해조 생육에 필수적인 영양염 공급
- 배출수가 연안 수 환경에 미치는 영향을 최소화하고 수질을 복원함

○ 사회 경제적으로도 지속 가능한 양식 확립

- 해조 수확에 따른 양식 어민의 수입원의 다양화와 추가 소득원 확보
- 해조 상품의 시장성과 경쟁력 확보

제 2 절 연구의 필요성

- 지속 가능한 친환경 해조 복합양식 시스템 개발 필요
- 연안 양식장의 자가오염과 뚜렷한 점오염원인 양식장 배출수에 의한 연안 부영양화의 환경 친화적 저감 방안 및 연안 수질 건강 유지 필요

- 생산성 유지를 위한 어장 환경용량 추정과 친 환경 양식의 필요성
- 사회 경제적 분야: 어민 소득원의 다양성 확보와 소득 증대
- 국제 협력 분야: 한미 해양과학 기술 협력사업의 약정과 관련된 사업의 하나로 해조 양식 전문 인력 교류, 기술 정보 교환과 공동연구가 필요함

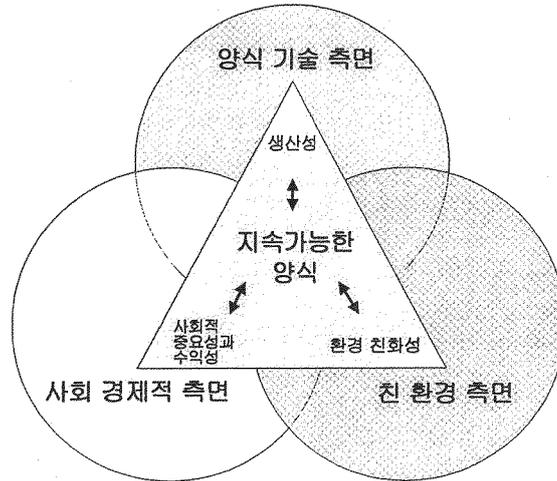


Fig. 1-1-1. 양식 시스템의 지속 가능성 (아시아 기술연구소, 1994)

제 2 장 국내외 연구개발 현황

제 1 절 국내 연구 개발 현황

국내에서도 복합양식과 관련된 연구는 수산 특정 연구개발 사업의 하나로 수산정책분야에서 ‘복합 양식 개발에 관한 연구(1990-94)’에서 이미 시작되었다. 양식업의 안정적인 생산과 단위 면적당 생산성 제고를 위해 4년 동안 4개 해역에서 수행한 연구 결과, 합리적이고 효과적인 복합양식장 개발 지침이 제시되었고, 수산업법과 수산업법 시행령에 복합양식어업 조항을 신설되어 복합양식의 기틀을 마련하였다. 대상 종들의 선정과 조합이 기존의 시설과 양식방법에 제한되어 진행되었지만 생산성과 경제성에서 실현 가능성이 높은 것으로 밝혀진 바 있다. 이에 따른 후속 연구는 없었지만 현장 애로 기술개발 사업의 하나로 ‘내수면에서 증양식 양어와 ‘채소수경의 복합영농에 관한 농가실증 실험(1994-97)’에서 진정한 복합양식 연구가 이뤄졌고, ‘배출수를 이용한 미나리의 수경재배’가 시도된 바 있다.

최근 양식장에서 나오는 배출수가 주변해양 환경에 미치는 영향에 대한 우려와 관심이 고조되면서 ‘육상양식장 배출수 처리 방법에 관한 연구(1993-95)’, ‘담수양어 시설의 설계 및 종합관리시스템의 개발(1994-97)’, ‘양어장 주변의 수질 저질 환경 변화와 적조 및 패혈증의 발생 및 방지 대책(1999-2002)’, ‘해수 육상 양식어업의 배출수 관리 및 적정처리 방안(2000-01)’, ‘해양오염물질제거 및 생태복원을 위한 중군제 및 3차 고도처리 시스템 개발(2001-04)’, ‘연안 어류 양식장 배출물의 재활용 방안 연구(2002-04)’, ‘양식장 바닥 저질개선을 위한 바이오 그래놀의 대량생산 및 적용 (2002-04)’ 등이 과제로 선정되어 연구되어 왔다.

지금까지 1990년대 초에 복합양식에 대한 연구를 시작하여 일부 종들에 대한 양식방법이 개발되었지만, 경제적인 여건과 실제 적용이 어려워 거의 실시되지 않고 있는 실정이며 오히려 그동안 단기적인 이익이 보장되는 집약적인 어류양식만 급속히 발전하여 연안 환경의 훼손이 더 심각하게 진행되고 있는 실정이다.

2000에 들어 ‘한국 양식’ 부경대 손철현 교수, 황은경 (현 수산과학원)등이 복합양식의 필요성 강조 하였고 2002년 제 3차 아시아태평양 조류학회(일본 츠쿠바)에서 복합양식에서의 해조 역할 분과 세미나가 열린바 있다. 때를 같이 하여 2002 과학기술부 국제 공동 연구사업의 하나로 한중 협력 과제가 3년동안 환경 친화적 복합양식시스템 개발이란 제목으로 수행된 바 있다.

제 2 절 국외 연구 개발 현황

오래 전부터 인도네시아, 아드리아해, 하와이, 중국 등에서 소규모로 바다에서 복합 양식이 적용되어 왔으며, 해조 복합양식의 가능성은 이미 70년대 중반 Ryther 가 제시한 바 있었으나 관심을 끌지 못하였지만, 최근 집약적인 기업형 어류양식의 배출수에 대한 엄격한 수질 규제를 극복하는 방안의 하나로 노르웨이, 유럽연합, 칠레, 하와이, 이스라엘, 캐나다, 미국, 남아프리카, 중국, 홍콩 등 여러 나라에서 다각적으로 복합양식 시스템에 대한 연구와 개발이 활발히 이뤄지고 있다. 특히 복합양식 연구는 여러 나라의 많은 연구 기관들이 공동으로 협력하여 진행되고 있는 경우가 많으며 대부분의 많은 연구들이 다국적 대규모 프로젝트에서 수행된 결과로 유럽쪽의 'SEPURA', 'BIOFAQs', 'GENESIS' 와 캐나다의 'AquaNet'가 이에 속한다.

가. AquaNet (Canada's Research Network in Aquaculture, 캐나다 양식 연구 네트워크)

(1) 개요

AquaNet 프로그램은 우선적으로 필요한 분야에 대하여 질 높은 연구와 교육을 통하여 유지 가능한 양식 산업을 육성하는 캐나다 프로그램으로 특히 우선 연구 분야를 설정하여 연구가 추진되고 있으며, 우선 연구 분야로는 연안역 통합관리, 미래 발전 방향 설정, 관련 분야 효율성 증진, 과학과 정책의 복합, 담수역 관리 전략, 어류와 인간의 건강, 영양염 흐름과 순환 어류 이용의 다변화 분야가 있다. 이 중의 하나로 패류와 복합양식이 선정되었고, 이 과제에서 어류-패류-해조 복합 양식 연구가 진행되고 있다..

(2) 관련 연구 과제 제목

유지 가능한 양식시스템 개발을 위한 3단계 영양준위 복합 다목적 연구

(3) 연구장소

캐나다 펀디만

(4) 연구 수준 또는 단계

산업화를 위한 시험 규모 (1단계, 2001-2; 2단계, 2003-5) 단계이다.

(5) 참여연구팀

Univ. of New Brunswick, Department of Fisheries and Ocean, Canadian Food

Inspection Agency, Heritage Salmon Co., Acadian Seaplants Ltd., Ocean Nutrition Canada. 등 6개 연구팀이 참여하고 있다.

(6) 목적

대서양 연어, 담치, 해조의 복합 양식으로 연어 양식산업의 다양화와 생물복원 기능을 확보하는 것이다.

(7) 연구 내용

연어 양식장 배출수의 효율적인 생물여과 처리; 영양분 공급을 통한 담치와 해조 생산률 증대; 수입 다변화와 시장 경쟁력 확보; 고용 노동력 활용도 증가가 주된 연구 내용이다.

(8) 공개된 연구 결과

연구는 실제로 연어 양식장에서 수행되었다. 단계 연구에서는 담치를 넣은 낭프로프에 붙인 해조 양식 시설을 연어 가두리 양식장 부근(20m)과 멀리 떨어진 대조구(1250m)를 띠디만 안에 설치하여 비교한 결과 양식장 부근 해조 생육이 대조구 보다 40% 높았고, 담치의 생육은 길이는 20%, 무게는 50% 많은 결과를 얻었음. 즉 증산된 부분의 해조와 담치의 유기물 생산은 연어 양식장에서 배출된 영양염에서 비롯된 것으로 결과적으로 배출된 영양염과 부유 입자태 물질을 담치와 해조가 여과한 결과로 추정하였다. 즉 배출수로 야기될 수 있는 부영양화를 복합양식을 통해 생물학적 여과방법으로 처리(복원)한 것으로 볼 수 있다. 2003년 시작된 2단계 연구에서 3군데 시설을 증설하고, 담치도 낭에서 로프 시설로 바꾸어 진행되고 있으며, 기초적인 복합양식 시스템의 효율은 물론 주변 해류의 흐름과 관련된 영향과 사회 경제적인 측면에 대한 연구 분야를 추가하여 수행되고 있다.

(9) 추가 연구 방향

생물여과(정화) 시스템의 효율을 평가하는 영양염의 흐름(순환)을 추정하는 계산과 모델을 구축하고 이를 바탕으로 담치와 해조를 수확하는 시기와 빈도를 결정하여 시장성을 유지할 수 있도록 하고, 생산된 해조는 다양한 활용방안을 모색하고 있다.

(10) 관련 정보

<http://www.aquanet.ca>

나. SEPURA (Seaweeds Purifying Effluents From Fish Farms)

(1) 개요

삶의 질과 생물자원 관리 프로그램의 하나인 유지가능한 수산업과 양식산업을 위한 양식장 배출수 수질복원(정화) 연구로서 유럽연합이 지원하는 2001년 2월에 시작하여 2004년에 끝난 3년 과제이다.

(2) 관련 연구 과제 제목

어류 복합양식장 배출수 수질복원시스템의 해조 종 다양화와 생산 개선

(3) 연구장소와 참여 기관

유럽연합 중 6개국 8 연구 기관이 참여 하였으며 이들은 다음과 같다:

Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI, 독일), Centro de Algologia Aplicada - Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (CAA, 스페인), Centre of Marine Sciences of the University of Algarve (CCMAR, 포르투갈), CIMAR - Universidade de Porto, CIMAR, 포르투갈), Queen's University Marine Laboratory (QUB, 영국), Grupo UVIFAN - Universidad de Malaga (UMA, 스페인), Centre d'étude et de Valorisation des Algues (CEVA, 프랑스), Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald (EMAUG, 독일)

(4) 목적

(가) 복합 다종양식 시스템 (Integrated poly-aquaculture system; IPAS)의 해조 종 다양화

복합양식에 적용할 고부가 가치 해조종을 개발하고 선별하는 것이다.

즉, 지금까지 적용되지 않은 고부가 해조 종을 개발하고 검증하여 복합 다종양식 시스템 (Integrated poly-aquaculture system; IPAS)에 적용할 해조종을 다양화하고; IPAS의 영양염 흡수 효율과 흡수율의 정량적인 자료를 확보하며, 생산한 해조 생물량을 이용하여 어류 사료 공급과 첨가제로 제공하였고 많은 연구 결과를 도출하였다. 그리고 IPAS에 적용할 해조 종자를 참여한 연구팀 별로 확보한 종은 다음과 같다: ULPGC (*Gracilaria cornea* var. *red*, *Grateloupia doryphora*, *Asparagopsis taxiformis*, *Gelidium arbuscula*, *Hypnea spinella*; *Laurencia chondrioides*; *Ulva rigida*), CCMAR (*Gelidium sesquipedale*, *Osmundea (Laurencia) pinnatifida*, *Gigartina teedii*), CIMAR (*Gracilaria* sp. , *Palmaria palmata*).

(나) 해조 생산성 개선 (신뢰도 향상성 시장성)

복합양식에 적용한 해조종의 생산성을 개선하기 위해 자동 광 차단막 장치를 활용하여 단일 주기 조건을 조성하여 유용 해조 종의 성장 가능기간을 확대하였고, 환경요인의 변화에서 야기되는 갈파래의 생활사를 조절하여 재상산 포자 형성을 억제하여 생산의 향상성을 유지 개선한 바 있다.

(다) 해조 생육 건강성 분석

해조 생육 상태의 건강성을 조기 진단하여 해조 생육의 향상성을 유지하여 생산과정의 경제적인 가치를 유지하였다.

(라) 어병관리 해조 항생제 추출

해조종에서 양식 어류의 질병을 감소시키는 항생물질을 개발하였다.

(마) IPAS의 경제성 평가

IPAS의 비용 편익 분석으로 수질개선 효과와 고 부가 가치 해조종으로의 전환하는 것과 이들의 수확에 따른 시장성을 고려하여 IPAS의 경제성을 평가하였다.

(5) 관련 정보

<http://www.seapura.com/>

다. GENESIS (GENEeric Sustainable Integrated Systems)

(1) 개요

해상 가두리 양식의 경우에는 양식 폐기물이 열린 공간으로 확산되기 전에 2차적인 수질 복원용 양식생물에 흡수되어 재순환하는 것을 확인하기는 어렵다. 그러나 육상 수조 양식에서는 방류수의 수질 복원이 비교적 간단하게 이뤄질 수 있다. 따라서 배출수를 이용한 복합양식으로 수질을 복원하고 추가 사료 공급이나 해수 공급없이 부가적인 수입도 얻을 수 있다.

(2) 관련 연구 과제 제목

포괄적 유지가능 복합양식 시스템

(3) 연구 장소

이스라엘, 영국, 프랑스

(4) 연구 수준 또는 단계

연구 또는 상업 어장에 적용 (2001. 7 - 2004. 7)

(5) 참여연구팀 (국가)

3개국 8개팀이 참여하였으며 그 명단은 다음과 같다: Israel Oceanographic & Limnological Research (IOLR, 이스라엘), French Research Institute for Exploitation of the Sea (IFREMER, 프랑스), University of Stirling (영국), SeaOr Marine Enterprises Ltd (이스라엘), Llyn Aquaculture Ltd. (영국), IDEE (프랑스), Environmental Management Consultancy (EnviroCentre, 영국), REEA (프랑스)

(6) 목적

유럽 환경과 시장에서 지속 가능한 바다 복합 양식 체제를 포괄적으로 개발하고 복합양식 시스템의 역학을 핵심 영양염(질소, 탄소, 인), 수온, 양식 대상종의 생육을 바탕으로 이해하고 평가하고자 하였다. 또한 해수, 영양염, 폐기물관리의 측면에서 복합양식 시스템의 기능을 최적화하고 강화하고자 하였다. 질병관리와 최종산물의 소비자 선택에 대한 시장성도 연구하였으며 재정의 요구성과 경제적인 수입을 기준으로 핵심 요인들의 영향을 파악하는 생물-경제모델을 개발하는 것이 목적이었다.

(7) 연구 내용

기후대 별로 고온, 온대, 저온 해역을 선정하고 이들 해역의 환경 기후 특성에 적합한 경제성이 높은 최고가 양식 품종인 어류와 새우의 생산을 최적화하고 이를 최우선적으로 관리하였다. 배출하는 방류수에 포함된 높은 영양염을 이용하여 부가적인 양식을 복합하여 실시하여 배출수의 수질을 복원하였다. 미세조류와 해조를 배출수를 이용하여 양식하고 양식한 미세조류와 해조를 먹이로 하는 고부가 가치 초식동물인 패류(전복), 성게 혹은 새우를 양식하였고 수질도 복원하고 수확한 저가의 해조를 이용하여 고가의 품종으로 생산하였다. 이러한 양식은 수조와 저수지에서 폐쇄 순환식으로 수행하고 방류수는 갯벌이나 습지로 흘려 내보내 마지막 자연정화와 갯벌식물(통통마디등)의 성장을 촉진하였다.

(8) 관련 정보:

<http://genesis.ocean.org.il/main.htm>

나라별로 연구되고 있는 현황은 표로 정리하면 다음과 같다(표 2-2-1).

표 2-2-1 나라별 연구 개발 현황

국 명	적 용 사 례
이스라엘	◦ Sea bream/ <i>Ulva</i> ; 전복/어류/ <i>Ulva</i> ; 전복/어류/조개류/ <i>Ulva</i> 등 복합양식
중국, 타이완	◦ 새우/게/해조; 홍합/가리비/다시마, 미역 복합양식
일본	◦ 새우/ <i>Ulva</i> 복합양식
유럽 기수역	◦ 복합 양식체제 시도
노르웨이	◦ 연어/담치/해조 복합양식
필리핀(노르웨이 공동)	◦ 연체동물 성게 해삼/ <i>Eucheuma Gracilaria</i> 복합양식
프랑스	◦ 폐수처리 시스템/ <i>Ulva</i> 이용
독일(+유럽연합)	◦ SEAPURA 해조 복합양식 및 수자원 복원 시스템 계획
남아프리카	◦ 어류양식폐수/ <i>Gracilaria</i> 복합양식
미국 북동해안	◦ 연어/김 복합양식체제 개발 중
미국 하와이	◦ 새우/ <i>Gracilaria</i> 복합양식
칠레	◦ 연어양식/해조biofilter 복합양식
호주	◦ 새우/해조 복합양식 시스템

제 3 장 연구개발 수행 내용과 결과

제 1 절 연구내용과 방법

1. 기반 조성단계: 종 선별 기술개발

(가) 대상 해조 종의 생리, 생육 특성 연구

기존 해조 양식종의 영양염 흡수 능력과 조직 내 영양염 축적 능력 파악하였다.

(1) 해조 영양염 흡수능력 파악

양식장 배출수의 용존태 질소(주로 암모니움)의 흡수능력을 암모니움 농도 와 빛 또는 수온별 환경요인을 조합한 조건에서 흡수율을 측정하였다. 해조의 암모니움 흡수율 분석은 Short-term N spiked incubation method(단기 N첨가 배양실험)로 실시하였다. 채집한 해조 시료는 유리섬유여과지(GF/C 47mm ϕ)로 여과한 여과해수에서 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 과 10 $^{\circ}\text{C}$ 혼합조건을 유지하며 4일 동안 배양기 내에서 순치시켰다. 암모니움(NH_4^+) 용액은 여과해수에 NH_4Cl 용액을 첨가하여 암모니움 표준 용액에서 20 또는 25, 40 또는 50, 75, 150, 250 1000 μM 로 희석하여 만들었다. 해조 시료는 암모니움 배양액 양의 1/10의 비로 습중량 1.0 g을 100 ml 배양액에 넣어 빛 조건 0, 10, 30-90, 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 과 수온은 10, 15, 20, 25 $^{\circ}\text{C}$ 로 맞추어 빛, 온도 구배 배양판에서 실험하였다. 실험 시작 후 0, 10, 30분, 그 후로 한 시간 간격으로 각 플라스크에서 1 ml씩 채수하여 Indo-phenol method로 NH_4^+ 을 분석하였다(Parsons *et al.* 1984).

$$\text{흡수율: Uptake rate (V)} = [(S_0 \cdot \text{vol}_0) - (S_t \cdot \text{vol}_t)] / (t \cdot B)$$

S_0 : 초기 NH_4^+ 농도(initial NH_4^+ concentration)

vol_0 : 초기 배양액 양(initial water volume)

S_t : t 시간에 대한 NH_4^+ 농도(NH_4^+ concentration)

vol_t : t 시간에 대한 배양액의 양(water volume at the end of a sampling interval)

t : 시간(the time elapsed between successive sampling)

B : 생물량(Biomass, dry weight)

실험 디자인에 따른 얻어진 자료의 검증에 위한 통계분석이 필요한 경우 ANOVA test를 실시하였다.

(2) 해조 조직 내 질소축적 능력 파악

해조 시료는 60°C에서 48hr 동안 건조시킨 후, 막자사발을 이용해 곱게 갈아 균질한 세립자로 만들었다. 해조 조직 내의 질소 함량은 일정량(약 0.3mg)의 세립질 분말을 취해 CHN 분석기(Perkin Elmer 2400 Ser. II)를 이용하여 탄소와 질소 성분비 분석하였다. 해조 건조량 당 탄소와 질소 분석으로 해조 조직 내 질소 축적률을 조사하였다.

(3) 해조 광합성, 영양염 흡수율과 성장률 상호관련성 분석

암모니움 흡수 실험이 시작하기 전과 후에 Plant Efficiency Analyzer (PEA) (Hansatech, UK)를 이용하여 유도형광으로 해조의 광합성효율(fv/fm)을 측정하였다. 영양염과 광도에 따른 광합성의 상호관련 기작을 분석하였다.

(4) 항생제 처리 시 해조의 영양염 흡수와 광합성 효율의 상호관련성 분석

어류의 질병을 예방하기 위해 주로 사용되는 항생제 Pefloxacin (Peperoxin), Amoxicillin Trihydrate (Amoxicillin), Florfenicol(Aquacol), Erythromycin thiosulfate (Erysulfa), Doxycycline (Doxivet), Erythromycin thiosulfate (Erythromycin), Oxytetracycline (OTC-24)를 각 항생제 마다 투여량을 기준으로 하여 0.1 ~ 40 g 처리하여 해조의 영양염 흡수와 광합성 효율을 측정하였다. 암모니움 농도 분석은 (1)과 같은 방법으로 분석하였다. 광합성 특성은 PEA 또는 Diving-PAM (Walz, Germany)을 이용하여 측정하였다.

PAM (pulse amplitude modulation)을 이용한 광합성 특성 측정은 광량 0 ~ 2160 $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ 정범위내에서 총 8단계에 걸쳐 rapid-light curves (RLCs)를 통해서 진행되었으며, 8 mm fiberoptics를 사용하였다. 모든 개체는 dark leaf clip을 이용해서 약 5~10동안 암적응 시켰으며, RLC를 측정하는 동안, 해조 시료는 각 단계마다 10초씩 빛에 노출시켰고, 약 0.8초씩 강한 빛에 노출시켰다. 일반적으로 육상식물의 전자전달속도(Electron Transport Rate - ETR)는 다음과 같은 식으로 표현된다(Schreiber *et al.* 1997; Ralph *et al.* 1998).

$$\text{ETR} = [(F_m - F_0)/F_m] \times \text{PAR} \times 0.84 \times 0.5$$

F_0 은 암적응 상태에서의 초기 형광, F_m 는 암적응된 상태에서 포화 광에 의한 최대 형광을 나타내고 두 값을 이용해서 암적응 상태에서 광계II (photosynthesis system II)의 광화학 반응에 대한 최대 양자수율(maximum quantum yield- $[(F_m - F_0)/F_m]$)을 도출하였다. PAR는 광량(photosynthetic active radiation: $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$), 0.84는 엽체의 평균 흡수된 빛을 의미하고 0.5는 광계II에 흡수된 빛을 의미한다. 보통 엽록소에 흡수된 빛은 광계 I 과 광계II에 똑같은 비율로 나뉜다고 가정하기 때문에 0.5를 사용한다. 본 연구에서는 대상 종의 엽체에서 흡수된 빛을 직접 측정하지 않고 일반적으로 고등식물에서 통용되는 0.84를 이용하였으므로, 이하에서는 상대 전자전달속도(rETR; relative electron transport rate)로 표현한다.

Diving PAM을 이용하여 측정된 광도에 따른 전자전달속도를 비선형 회귀법으로 적합화하여 매개변수들을 구했다. RLCs는 Platt *et al.*(1980)에 의해 고안된 방법을 이용해서 나타낼 수 있다.

$$P = P_s [1 - \exp(-aE_d/P_s)] \exp(-\beta E_d/P_s) \quad (1)$$

여기에서 P 는 구하고자하는 총 일차 생산력, E_d 는 광합성에 이용되는 파장의 광량 (wavelength 400 ~ 700 nm), P_s 는 광저해 현상이 없을 때의 최대 잠재 전자전달 속도로서 정의되는 매개변수, a 는 광합성의 최대 양자수율(maximum quantum yield)과 관련된 매개변수로서 세포가 입사광을 모을 수 있는 능력을 나타내는 값으로, 포화광 이하에서 광합성-광도 모델의 초기 기울기를 나타내고 β 는 광저해 정도를 나타내는 매개변수이다. 광저해 현상이 없을 때($\beta = 0$) (1)식은 다음과 같이 요약할 수 있다.

$$P = P_m [1 - \exp(-aE_d/P_m)] \quad (2)$$

광저해가 있을 경우 포화광에서 상대 전자전달속도의 최대 비율(Relative ETR_{max})은 광합성 수용능력 (P_m)으로 표현할 수 있고, 다음과 같이 요약할 수 있다.

$$P_m = P_s [a/(a+\beta)] [\beta/(a+\beta)]^{\beta/a} \quad (3)$$

또한, 전자전달을 위한 포화광량 (E_k)은 P_m 와 a 을 이용해서 구하였다.

$$E_k = P_m/a \quad (4)$$

본 연구에서는 광화학적 소멸(qQ)과 비광화학적 소멸(NPQ) $((F_m - F_m')/F_m')$ 계수를 Schreiber *et al.*(1986)에 의한 방법으로 구하여 분석하였다.

(나) 대상 해조 종의 생활사에 따른 생식 계절성 연구와 복합양식 시스템 적용 방안 연구

복합양식에 적용할 예비 대상 종 선별을 위한 현장 조사와 선별을 위한 기초 생리 생태 연구를 실시하였다.

(1) 양식장 주변 해역 해양환경의 모니터링과 해조 생육상황 월별 조사

양식장 환경 조사는 다년간 자료를 확보가 필수적이다. 따라서 현재 이러한 모니터링이 진행되고 있는 해역에서 공동으로 참여하여 자료를 도출하였다. 수질조사는 신중암 교수 연구팀(여수대)와 여수지방 해양수산청 수산관리과 팀과 공동으로 현장 조사를 수행하였다. 본 연구팀이 참여한 기간은 2003년부터 2004년까지이며, 여수 인근 해역에서 조사하였다(Fig. 3-1-1). 현장에서 조사항목은 염분, 수온, 용존산소(YSI 85D) 등이며, 실험실 해수 분석을 통해 용존 산소, 영양염 농도, 엽록소 합량 등을 분석하였다(Parsons *et al.* 1984).

시계열 모니터링은 계절별 24시간 이상 연속 조사하였다.

해조 군집 조사는 종 구성, 우점종 생태 특성 (피도, 습중량, 건중량, 생식 계절성) 파악하기 위해 통영인근해역에서 간단한 현장 조사를 실시하였다. 해조 군집의 탄소, 질소 합량 분석(CHN)을 하였다.

(2) 우점 해조 종에 대한 영양염 흡수율 파악

복합양식이 가능한 자연산 해조 종에 대한 영양염 흡수율 변화 조사하였다.

◎ 기반 조성단계 추가 실험- 하계 종 선별 기술 개발

일반적으로 여름철에는 양식하는 해조종이 없다. 따라서 여름철 고수온에 견디는 해조종의 선별이 필요하다. 여름철 복합양식 대상 종 선별을 위해 여름철에 생육하는 청각(*Codium fragile*)을 대상으로 수온과 광도 조건 하에서 영양염 흡수 능력을 파악하였다. 실험 (1)과 같이 진행되었다.

2. 초기 적용단계: 선정된 종에 대한 중규모 양식 시스템 적용 연구

(가) 대상 해조 종의 중규모 시스템의 생리, 생육 특성 연구

실험실 내에서 빛과 수온 구배에 따른 해조의 영양염 흡수 능력을 측정한 소규모 시스템의 자료와 해조 종의 계절성을 바탕으로 하여 중규모 시스템으로 확대 적용하였다. 암모니움 표준용액 넣어 주지 않고, 어류 수조에서 나오는 배출수를 이용하여 해조류의 암모니움 흡수양상을 조사하였다.

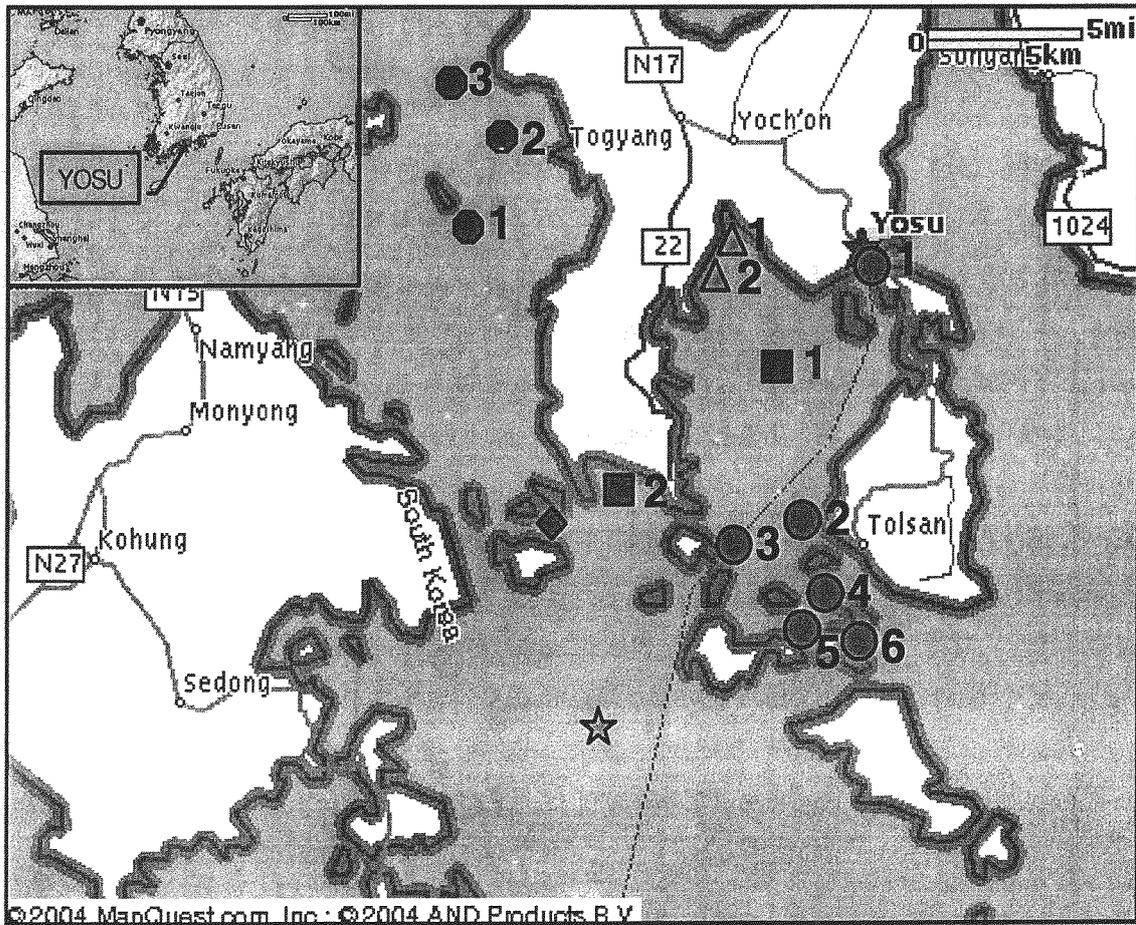


Fig. 3-1-1. Map of the monitoring area in Yosu area showing the sampling sites (●); Finfish aquaculture area (1, Doldandaegyo; 2, Geombong; 3, Baekya; 4, Hwaetae; 5, Weolhang; 6, Daedoora): △; Shellfish (mussel) aquaculture area (1, Soho; 2, Songso): ■; Shellfish aquaculture area (1. Gamakseom; 2. Jangsoo): ◆; Shellfish (ark shell) aquaculture area (Gyupo): ●; Shellfish aquaculture area (1, Yeojado; 2, Sagok; 3, Bongjeon): ☆; Reference open sea site (Bodolbada).

(※수질조사는 신종암 교수 연구팀(여수대)와 여수지방 해양수산청 수산관리과 팀과 공동으로 현장 조사를 수행하였음.)

(1) 탱크 디자인과 생산/여과 시스템 개발

어류수조와 해조류 수조를 연결하여 순환식, 개방식 혼합양식(aeration or circulation method) 수조 시스템을 제작하였다. 수조 시설은 여수대학교 돌산도 중앙양식 센터 내에 있는 수조를 이용 하였다. 어류수조는 약 3 ton 정도, 해조류 수조는 약 0.2 ton 정도의 규모로 실험하였다. 어류수조에서 나온 배출수에 포함된 사료 찌꺼기 등을 여과하기 위해 산호나 모래로 채운 약 1 ton 정도 크기의 침전 수조를 통해 해조류 수조로 보내주었다. 어류 수조 1개와 침전조 1개 그리고 해조류 수조 4개를 연결하여 제작하였다.

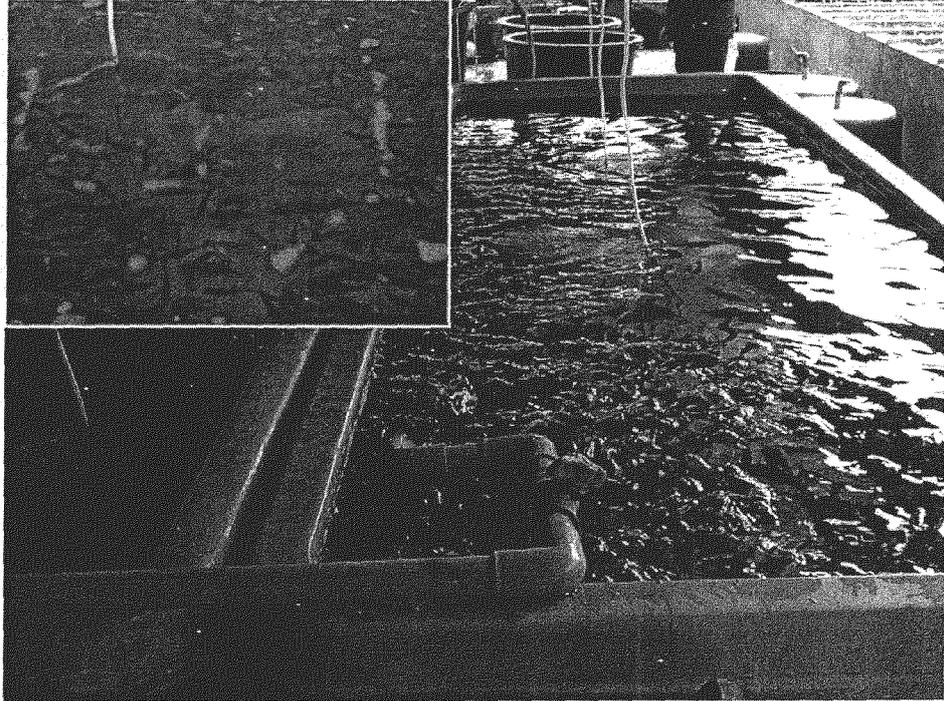
실험에 이용된 어종은 감성돔(*Acanthopagrus schlegeli*)으로 전장 5~10cm 크기이며, 개체수는 수조의 크기와 개체수가 크기를 고려하여 넣어 주었다. 감성돔의 사료 급이 시간은 수온이 낮은 동계에는 하루 한번, 하계에는 두 번으로 반복 급이 하였다.

혼합양식 대상 해조 종은 김(*Porphyra* sp.), 미역(*Undaria* sp.), 다시마(*Laminaria* sp.), 청각(*Codium fragile*), 갈파래(*Ulva* sp.)를 대상으로 조사하였다. 해조는 0.2 ton 수조에 각각 약 2 kg씩 넣었다. 김과 파래의 경우 엽체가 퇴수구를 막아 수조의 물이 넘치는 경우가 발생하여 양파망에 나누어 담아 수조에 넣어 주었다(Figs. 3-1-2, 3).

(2) 모니터링

위와 같이 제작 한 복합양식 시스템의 유지 및 효율성을 평가하기 위해 1 ~ 20 일 동안 지속적으로 순환 시스템을 유지시켰다. 본 연구는 완도 수산 고등학교와 수산과학원 완도 정도리 배양장 내의 수조 시설을 이용하였다. 여름철 기온 상승으로 인한 순환식 수조 시스템의 수온 상승을 막고 적정 수온을 유지 시켜 주기 위해 냉각기를 설치하였다. 배출수의 암모니움 농도 측정은 24시간동안 두 시간 간격으로 채수하였고, 20일 동안 하루에 세 번씩 채수하여 Indo-phenol method로 분석하였다(Parsons *et al.* 1984). 또한 PAM을 이용하여 해조의 광합성 특성을 측정하여 해조가 건강하게 유지되는지 여부를 알아보았다.

(A)



(B)

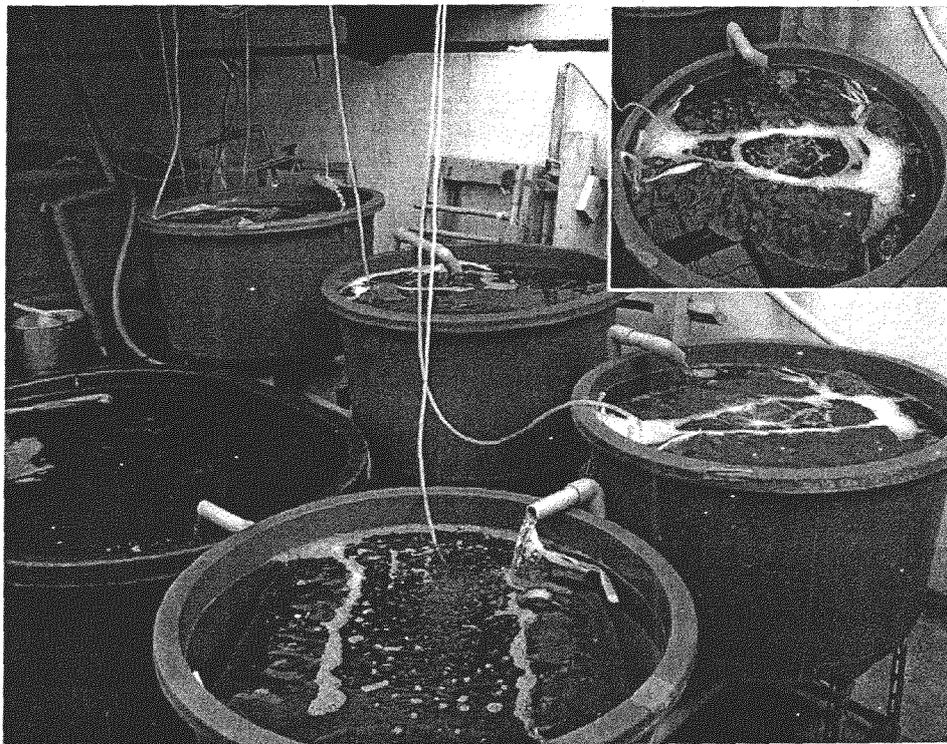


Fig. 3-1-2. A pilot Seaweed Sustainable Integrated Aquaculture System at Aquaculture Research Center YNU (A) Fish tank (B) Seaweed tank

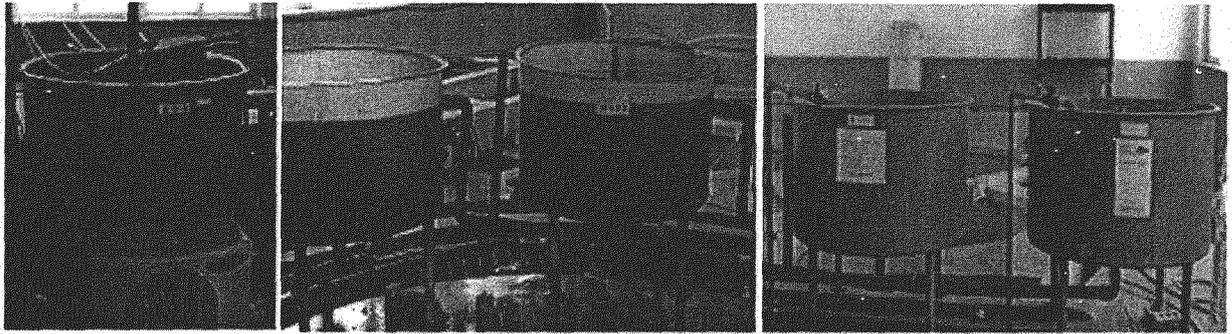


Fig. 3-1-3. A pilot Scaweed Sustainable Integrated Aquaculture System at Wando High School (A) Figh tank (B) Seaweed tank

(3) Seed Bank 유지

원활한 종묘 공급을 위해 대상 종들의 종묘 은행을 설치 운영이 필수적이다. 본 연구에서는 기존의 증양식 종을 대상으로 실시하였기 때문에 별도의 종 은행의 유지는 필요하지 않았다. 청각의 경우 최근의 연구에서 양식의 기초 연구가 이뤄지고 있다(※양식학회 포스터발표 Eun Kyoung Hwang *et al.* 2005).

(나) 중규모 시스템에서의 대상 종의 생태, 생육과 운영 시뮬레이션 모델 개발

단순 흡수 기작을 현장에 적용할 수 있는 중규모 모델 개발을 위해 STELLA model을 활용하였다.

(다) 육상 수조 해조 복합양식 시스템과 해상 가두리 양식장에 해조 복합양식 시스템 적용을 위한 pilot 규모 실험 (※연구 계획 심사에서 제시한 검토사항에 대한 보완 추가 항목)

육상 수조 양식에 해조 여과 생산 시스템을 적용하기 위한 최적 운영 방안 모색 하여 pilot 규모은 위 (가) 탱크 수조 실험을 제시되었다.

제 2 절 연구결과와 토론

1. 기반 조성단계: 종 선별 기술개발

(가) 대상 해조 종의 생리, 생육 특성 연구

(1) 해조 영양염 흡수능력 파악

양식 해조 종을 대상으로 영양염(암모니움) 농도에 따른 흡수 양상을 비교하였다.

김(*Porphyra yezoensis*)과 파래(*Enteromorpha* sp.)의 흡수 양상은 암모니움 농도 40, 75, 150, 1,000 μM 조건으로 암모니움 농도를 높여 흡수 양상을 살펴 본 결과 높은 농도로 갈수록 흡수율이 현저하게 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 3-2-1A). 높은 암모니움 농도(1,000 μM)에서 흡수가 일어난 해조의 광합성 활성은 암모니움 흡수가 일어난 120분 후에 김의 경우는 0.58 ~ 0.63의 범위로 큰 변화를 보이지 않았으며, 파래는 0.67 ~ 0.84로 광합성 효율(f_v/f_m)이 높아지는 경향을 나타냈다(Fig. 3-2-1B). 김과 파래의 암모니움 흡수 경향은 실험 농도 구간에서 NH_4^+ 농도가 높아질수록 흡수 능력이 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한 김과 파래의 암모니움 흡수율은 실험 농도 구간에서 초기 0 ~ 20분 동안 높게 나타나는 surge uptake를 보였다(Table 3-2-1).

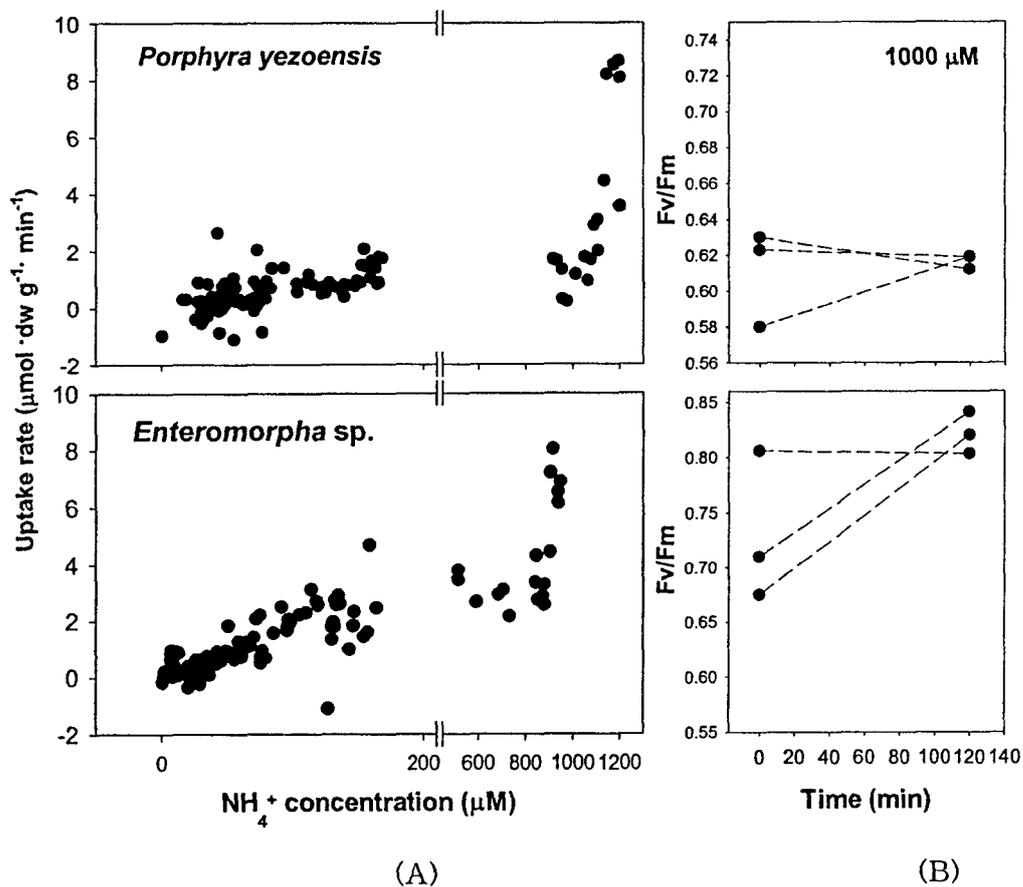


Fig. 3-2-1. A plot of ammonium uptake rate vs. ammonium concentrations (A) and their photosynthetic efficiencies (B) of *Porphyra yezoensis* and *Enteromorpha* sp.

Table 3-2-1. The ammonium uptake rates of *Porphyra yezoensis* and *Enteromorpha* sp. at different ammonium concentrations

	<i>Porphyra yezoensis</i>		<i>Enteromorpha</i> sp.	
	NH ₄ ⁺ conc. (μM)	Uptake rate (μmol · g ⁻¹ dw · min ⁻¹)	NH ₄ ⁺ conc. (μM)	Uptake rate (μmol · g ⁻¹ dw · min ⁻¹)
V ₀₋₂₀	40	0.160±0.117	40	0.394±0.044
	75	0.245±0.031	75	0.570±0.103
	150	0.885±0.187	150	1.673±0.115
	250	1.449±0.008		
V ₆₀₋₁₂₀	40	0.105±0.081	40	0.116±0.079
	75	0.211±0.077	75	0.057±0.005
	150	0.506±0.198	150	0.125±0.066
	250	0.775±0.173		

미역(*Undaria* sp.)과 다시마(*Laminaria* sp.)의 NH₄⁺흡수 능력을 파악하기 위해 약 3 ton 크기의 수조에 암모늄 농도 100 μM 조건으로 하여 24시간 동안 조사하였다. 미역의 경우 실험 시작 후 12시간 내에 초기 농도에서 10 μM 이하로 감소하였고 다시마는 24시간 후에 10 μM 이하로 감소하였다(Fig. 3-2-2).

양식종 뿐만 아니라 현장에서 채집한 야생종을 대상으로 하여 암모늄 흡수 양상을 조사하였다. 통영만 부근에서 채집한 잎꼬시래기(*Gracilaria textorii*), 도박(*Pachmeniopsis elliptica*), 구멍갈파래(*Ulva pertusa*), 쌍발분홍치(*Rhodymenia intricata*), 넓은 지누아리(*Grateloupia livida*), 마디잘록이(*Lomentaria catenata*)에서 NH₄⁺ 흡수율은 실험 구간에서 가장 높은 150 μM 일 때 가장 높은 경향을 보였다(Table 3-2-2). 부산 연안(청사포)에서 채집한 잎꼬시래기(*Gracilaria textorii*), 꼬시래기(*Gracilaria verrucosa*), 가시우무(*Hypnea charoides*), 참진두발(*Chondrus ocellatus*)는 실험 구간의 다른 농도에 비해 NH₄⁺ 75 μM 일 때 비교적 높은 흡수율을 나타냈다(Table 3-2-3).

그 중 꼬시래기를 대상으로 수온, 광도 구배에 따른 암모늄 흡수 능력을 조사하

여 보았다. 암모니움 농도 일 때 25 °C에서 가장 흡수가 많이 일어났다. 또한 빛 조건 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ 에서 영양염 흡수가 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ 이하에서 보다 활발하게 나타났다. 반면에 광합성 활성은 높은 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ 에서 광저해 현상으로 인해 약 0.62에서 0.44로 낮아졌고, 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ 에서는 약 0.57에서 0.62로 영양염 흡수 후 높아지는 것을 알 수 있었다(Fig. 3-2-3). 또한 NH_4^+ 75 μM 에서도 25 °C, 빛이 있는 조건에서 흡수가 가장 활발하게 나타났다(Fig. 3-2-4).

구멍갈파래의 경우에서도 25 °C에서 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ 조건에서 암모니움 흡수가 높게 나타나는 꼬시래기와 같은 경향을 나타냈다(Fig 3-2-5). 따라서 여름철의 복합양식 대상종으로 꼬시래기와 구멍갈파래가 적절한 것으로 판단된다.

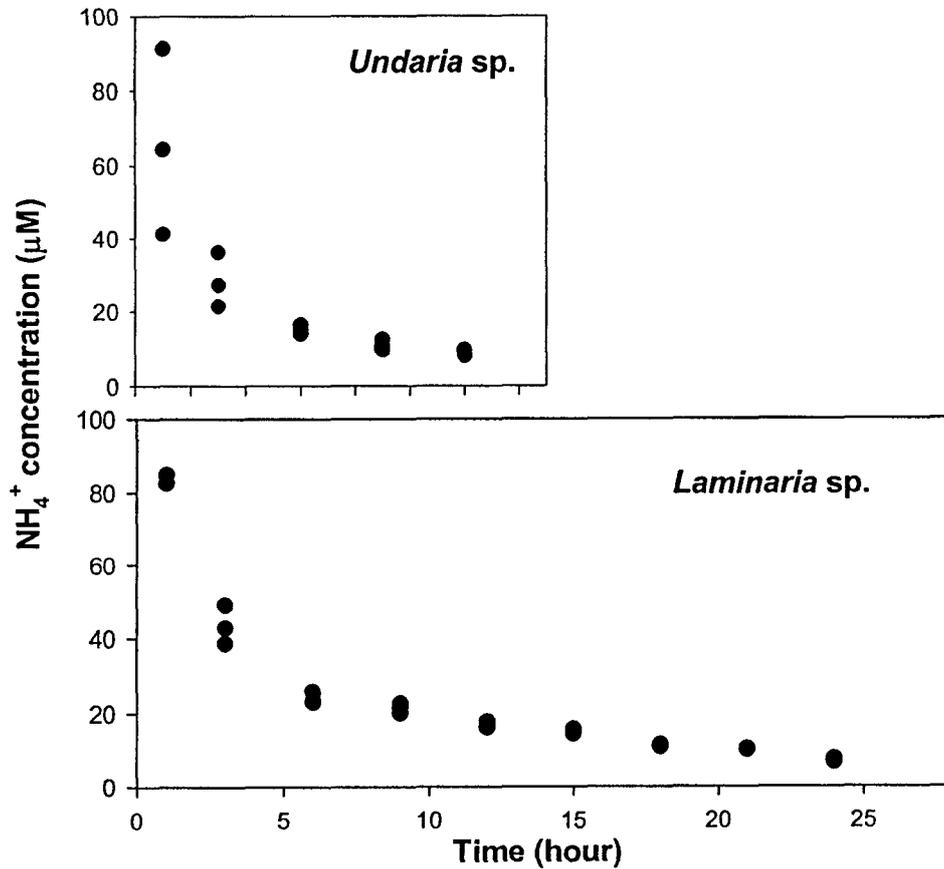


Fig. 3-2-2. The pattern of ammonium decrease in *Undaria* sp. and *Laminaria* sp. in ammonium added tank incubation.

Table 3-2-2. The ammonium uptake rates of several wild seaweed species in the Tongyeong Bay area.

	NH ₄ ⁺ conc. (μM)	Uptake rate (μmol · g ⁻¹ dw · min ⁻¹)	NH ₄ ⁺ conc. (μM)	Uptake rate (μmol · g ⁻¹ dw · min ⁻¹)
	<i>Gracilaria textorii</i>		<i>Pachmeniopsis elliptica</i>	
V ₀₋₂₀	20	0.734±0.021	20	0.671±0.015
	40	3.627±0.048	40	0.835±0.028
	75	2.672±0.050	75	3.347±0.166
	150	3.620±0.234	150	6.154±0.784
	<i>Ulva pertusa</i>		<i>Rhodomenia intricata</i>	
V ₀₋₂₀	20	0.602±0.016	20	2.838±0.137
	40	1.065±0.092	40	5.620±0.370
	75	2.897±0.053	75	8.759±0.402
	150	14.423±0.139	150	23.875±1.139
	<i>Grateloupia livida</i>		<i>Lomentaria catenata</i>	
V ₀₋₂₀	20	1.650±0.510		
	40	3.008±0.068		
	75	3.858±0.112	75	0.852±0.013
	150	17.825±0.388	150	3.532±0.081

Table 3-2-3. The ammonium uptake rates of several wild seaweed species in the coast of Busan.

	NH ₄ ⁺ conc. (μM)	Uptake rate (μmol · g ⁻¹ dw · min ⁻¹)	NH ₄ ⁺ conc. (μM)	Uptake rate (μmol · g ⁻¹ dw · min ⁻¹)
		<i>Gracilaria textorii</i>	<i>Gracilaria verrucosa</i>	
V ₀₋₂₀	20		20	0.003±0.004
	40	0.287±0.024	40	
	75	1.106±0.096	75	1.266±0.080
	150	0.778±0.125	150	0.730±0.118
		<i>Hypnea charoides</i>	<i>Chondrus ocellatus</i>	
V ₀₋₂₀	20		20	0.073±0.007
	40	1.959±0.636	40	0.131±0.007
	75	1.678±0.294	75	0.189±0.012
	150	3.127±0.566	150	0.575±0.030
<i>Grateloupia turuturu</i>				
V ₀₋₂₀	150	0.899±0.278		

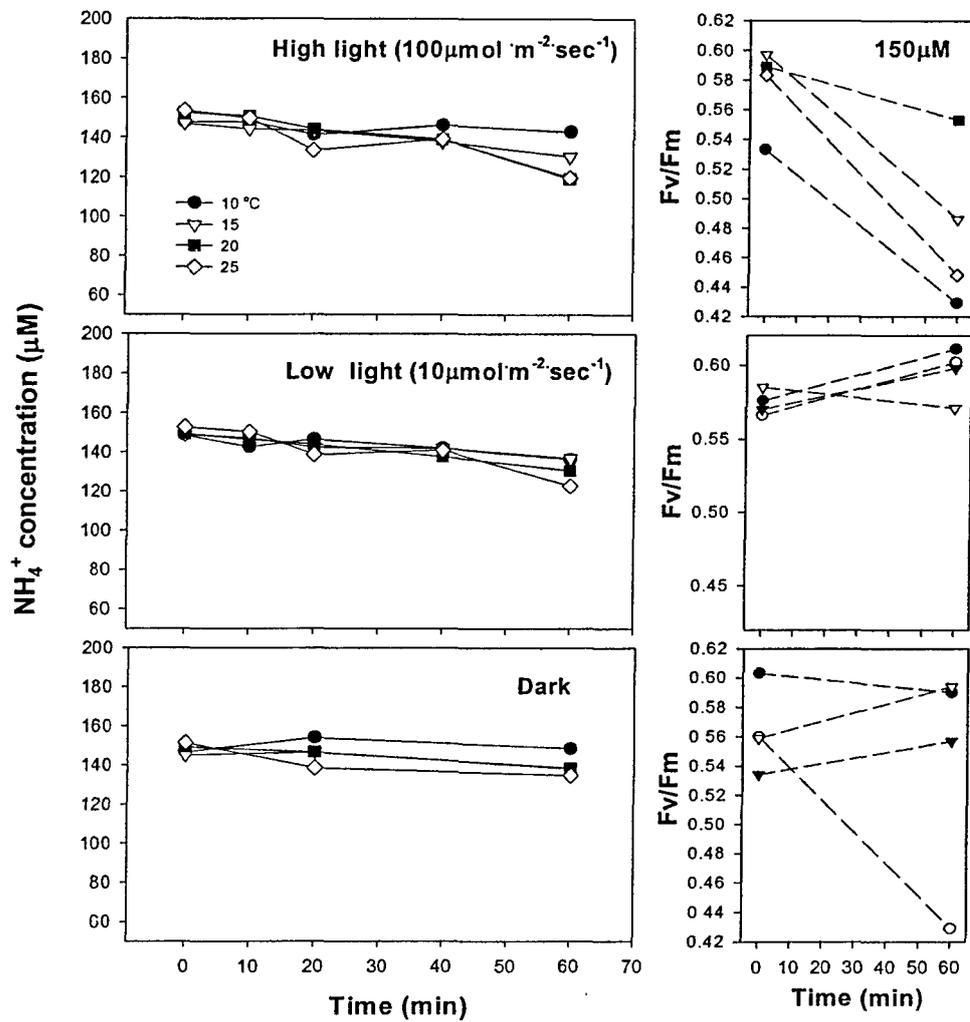


Fig. 3-2-3. A plot of ammonium decrease and their photosynthetic efficiencies of *Gracilaria* sp. at the various combinations of light and temperature.

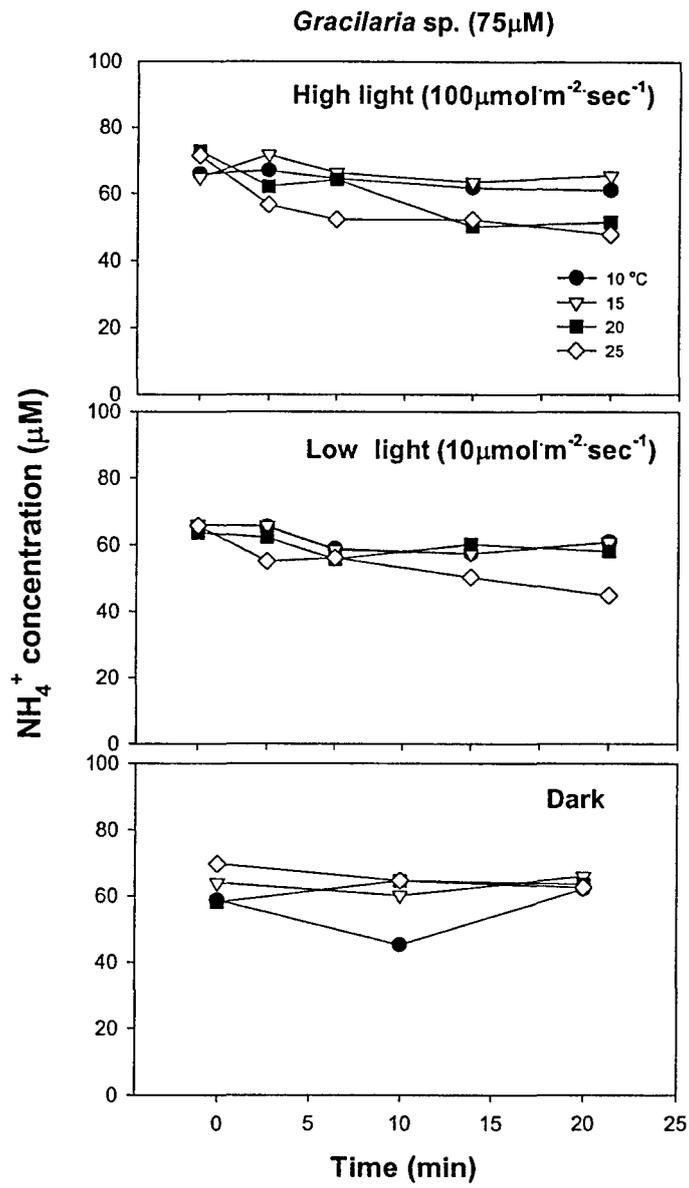
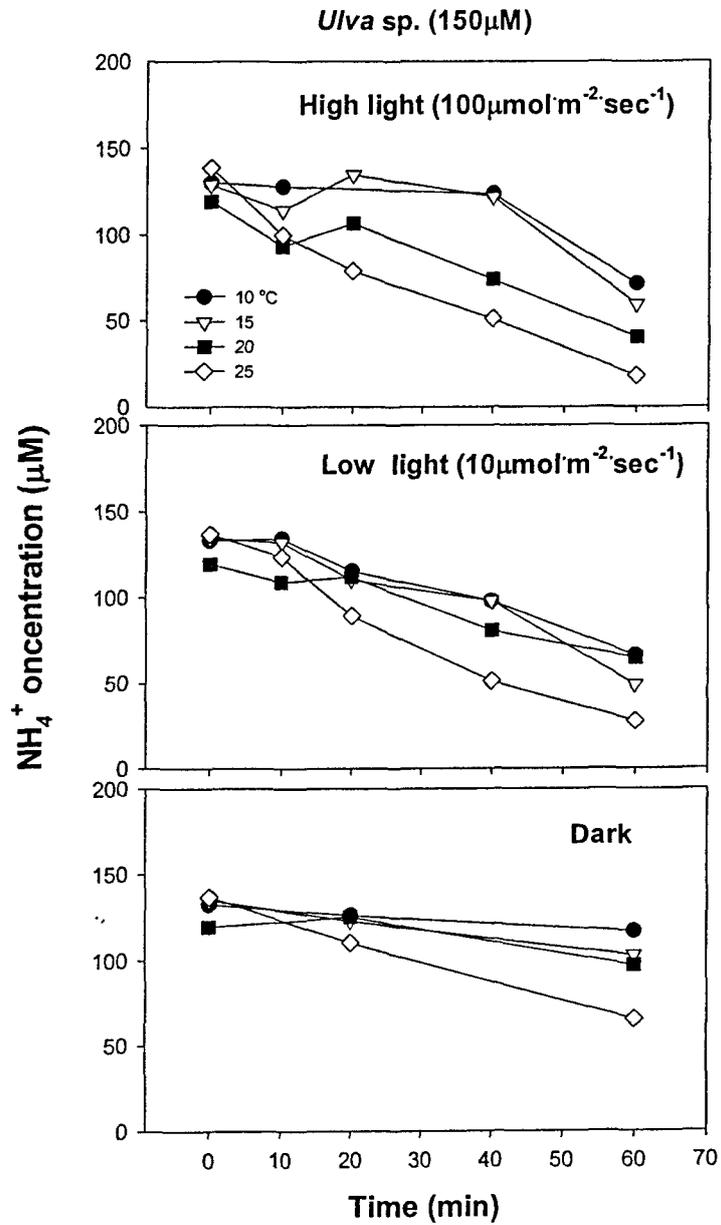


Fig. 3-2-4. A plot of ammonium decrease in *Gracilaria* sp. media at the various combinations of light and temperature.



1 Fig. 3-2-5. A plot of ammonium decrease in *Ulva* sp. media at the various combinations of light and temperature.

(2) 해조 조직 내 질소축적 능력 파악

해조 조직 내 질소 함량은 서식 환경과 해조 종에 따라 차이가 있지만 일반적으로 피코 빌린 색소단백질을 가진 홍조류에서 가장 높게 나타났다. 홍조류 중 김은 5.13% 으로 다른 종들에 비해 매우 높은 질소함량을 나타냈다(Table 3-2-4). 갈조류 중 미역도 3.86% 으로 질소 함량이 높게 나타났다. 이러한 질소 함량은 복합양식 대상 종 선별하는 중요한 기준이 되는 특성을 가진다. 또한 질소 함량이 높은 김과 미역은 대표적인 양식 종으로서 영양염 흡수를 통한 정화능력 뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 만족 시켜 줄 수 있다고 생각된다.

2003년 5월에서 2004년 4월에 암반 조간대에 서식하는 녹조 갈파래(*Ulva* sp.)와 파래(*Enteromorpha* sp.)의 질소 함량은 주변 영양염의 농도가 높은 곳에서 높게 나타났다. C/N비도 10월을 제외하고는 Redfield 비와 비슷한 수준이었다. 영양염의 농도가 낮은 곳에서는 조직 내 질소 함량이 낮게 나타났으며, 따라서 C/N비가 높게 나타났다. 서식환경에 대한 해조 조직 내 질소 함량의 차이는 보였으나, 계절에 대한 경향은 볼 수 없었다(Fig. 3-2-6).

Table 3-2-4. The tissue nitrogen content (%) of the wild seaweed species on the rocky shore during the study period of the South Sea in Korea

Species		Nitrogen content (%)		
		Average	Max	Min
Rhodophyceae	<i>Chondracanthus teedii</i>	3.61	6.23	2.45
	<i>Chondria crassicaulis</i>	3.72	4.35	2.77
	<i>Chondrus ocellatus</i>	2.67	4.12	1.41
	<i>Gelidium amansii</i>	3.12	4.34	2.28
	<i>Gracilaria textorii</i>	3.61	3.97	3.24
	<i>Hypnea charoides</i>	3.02	3.93	2.20
	<i>Lomentaria catenanta</i>	2.81	4.17	1.10
	<i>Pachymeniopsis elliptica</i>	2.85	5.10	1.14
	<i>Porphyra</i> sp.	5.13	5.74	4.32
	<i>Hizikia fusiformis</i>	2.48	4.01	1.04
Phaeophyceae	<i>Sargassum</i> sp.	2.57	4.72	0.93
	<i>Sargassum thunbergii</i>	2.49	4.01	1.32
	<i>Undaria pinnatifida</i>	3.86	4.93	1.89
Chlorophyceae	<i>Ulva pertusa</i>	3.34	6.80	1.48

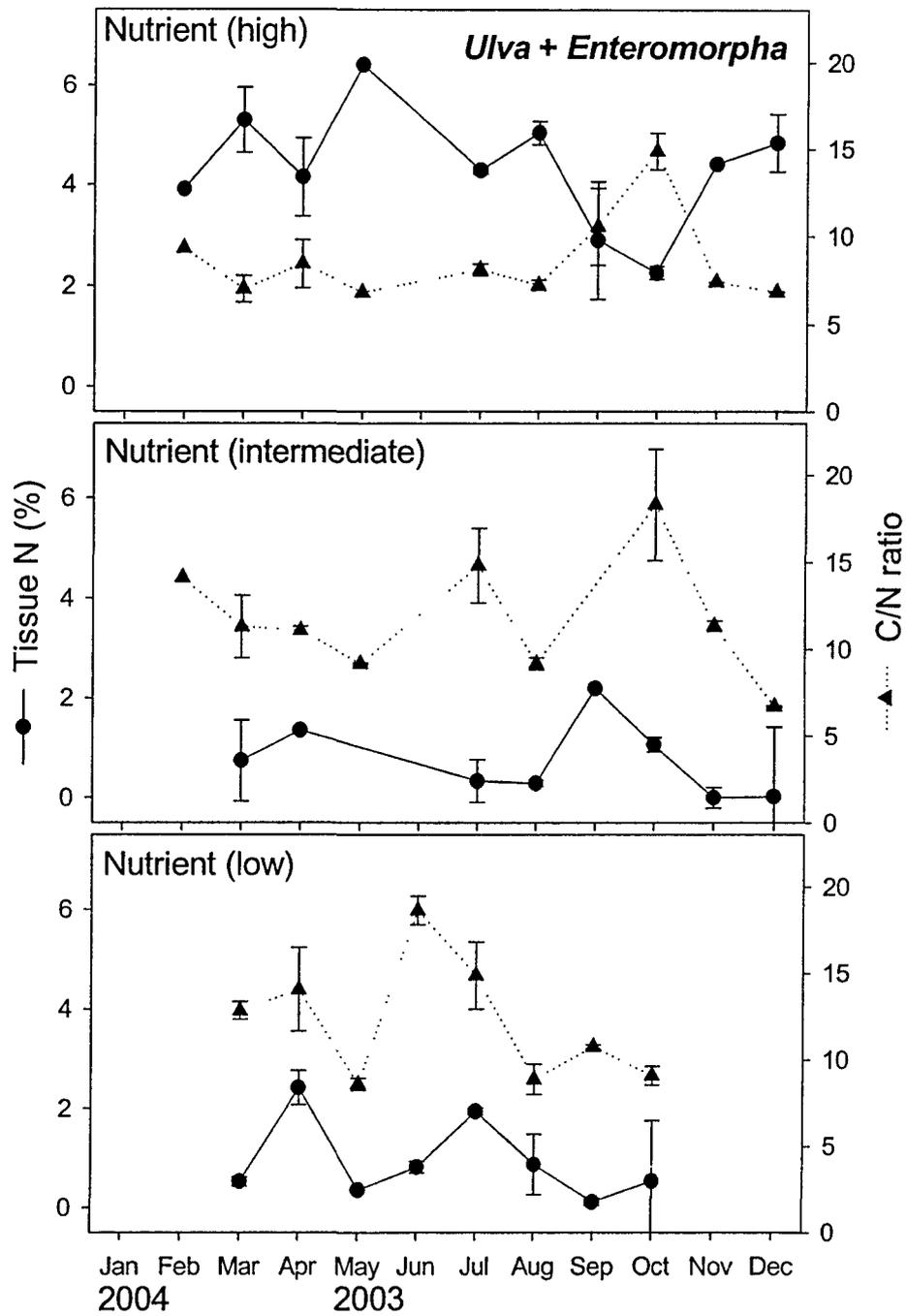


Fig. 3-2-6. The tissue nitrogen content (%) and the C/N ratio of the green alga (*Ulva pertusa* + *Enteromorpha* sp.) on the rocky shore from the ambient nutrient concentrations of high, intermediate and low level during the study period from May 2003 to April 2004.

(3) 해조 광합성, 영양염 흡수율과 성장률 상호관련성 분석

수온, 광도, 영양염 조건에서 영양염 흡수 능력을 조사하고, 광합성 효율(fv/fm)을 측정하여 암모니움 흡수 실험 전과 후의 해조 상태를 파악하였다. 꼬시래기는 고수온에서 높은 광도에서 영양염 흡수율이 가장 높은 반면, 광합성 활성은 낮은 광도에서 높았다(Fig. 3-2-3). 구멍갈파래의 경우 고수온과 고광도에서 높게 나타났다(Fig. 3-2-1). 따라서 높은 광도에 노출된 해조는 시간이 지남에 따라 광 저해 현상으로 인해 광합성 효율이 감소하는 것을 알 수 있었다.

(4) 항생제 처리 시 해조의 영양염 흡수와 광합성 효율의 상호관련성 분석

어류양식장의 수질 유지를 위해 첨가 하는 항생제가 해조의 광합성 활성과 암모니움 흡수에 미치는 영향을 조사하였다. 항생제 Pefloxacin (Peperoxin), Amoxicillin Trihydrate (Amoxicillin), Florfenicol(Aquacol)은 적정 투여 농도에서 김의 광합성 효율(fv/fm)에 거의 영향을 주지 않았다(Fig. 3-2-7). 항생제 Erythromycin thiosulfate (Erysulfa), Doxycycline (Doxivet), Erythromycin thiosulfate (Erythromycin), Oxytetracycline (OTC-24)을 적정 농도 투여한 배양액에서는 김의 광합성 활성이 낮아지는 경향을 나타냈다. 항생제 Erythromycin thiosulfate (Erysulfa), Erythromycin thiosulfate (Erythromycin), Oxytetracycline (OTC-24)은 20시간 후 회복되는 현상이 나타났으나, Doxycycline (Doxivet)은 2시간 내에 광합성 활성이 현저하게 낮아졌다(Fig. 3-2-8).

또한 Doxycycline, Oxytetracycline (OTC-24), Erythromycin thiosulfate (Erythromycin)를 처리한 김의 암모니움 흡수 양상은 최고 높은 항생제 농도(각 5, 2.5, 12.5g/l)에서 일어나지 않았으나, 높은 농도를 제외한 모든 농도 구간에서 암모니움 흡수가 활발하게 나타났다(Fig. 3-2-9). 항생제 적정 처리 농도에 준하여 투과한다면 해조의 영양염 흡수에 크게 영향을 미치지 않을 것이라고 생각된다.

PAM을 이용하여 항생제 처리한 김의 광합성 특성을 알아보았다. 각 항생제의 영향을 시간에 따른 엽록소 유도형광의 변화에서 광화학적 소멸(qQ)과 비광학적 소멸(NPQ)계수를 Schreiber et al.(1986)에 따라 분석하였다. 형광 발생 기작에 미치는 영향은 다음과 같은 3가지 형태의 양상을 보여주었다(Figs 3-2-10, 11).

- ① High NPQ와 low qP의 경우 (예: Amoxicillin, Erithromycin) - LHCII가 PSII에서 분리되는 경향
- ② High NPQ와 qP의 경우 (예: Peperoxin) - LHCII가 PSII에서 분리되는 경향
- ③ Low NPQ와 qP의 경우(예: OTC-24) - qE (높은 Δ pH, LHCII에서 들뜬

에너지의 소멸)와 'PS I'과 'PS II' 사이의 전자전달 흐름의 붕쇄되는 경향의 3가지 유형이 나타났음.)

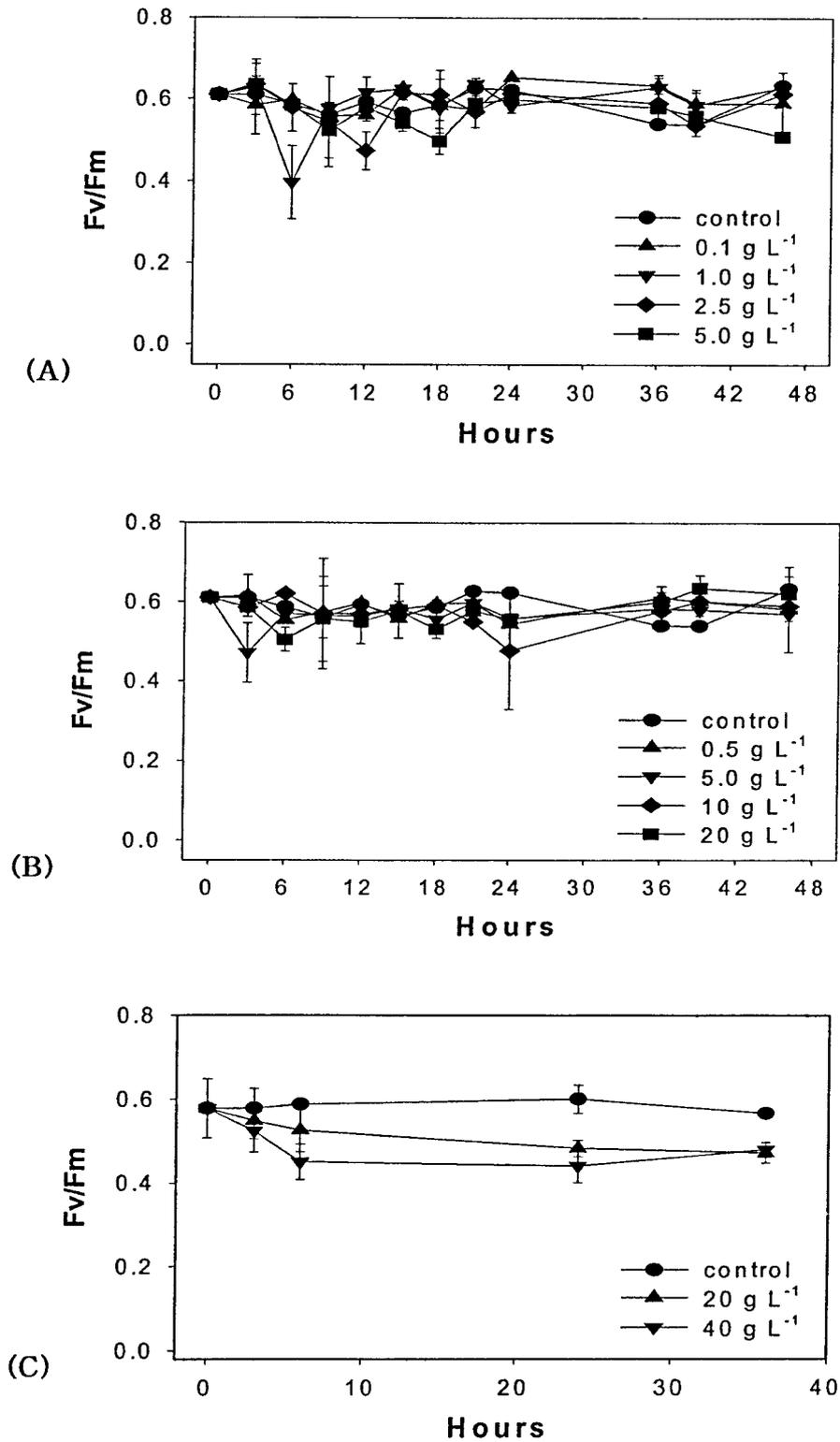


Fig. 3-2-7. Effects of antibiotics on photosynthetic activity of *Porphyra* sp.: (A) Pefloxacin (Peperoxin), (B) Amoxicillin, Trihydrate (Amoxicillin), (C) Florfenicol (Aquacol).

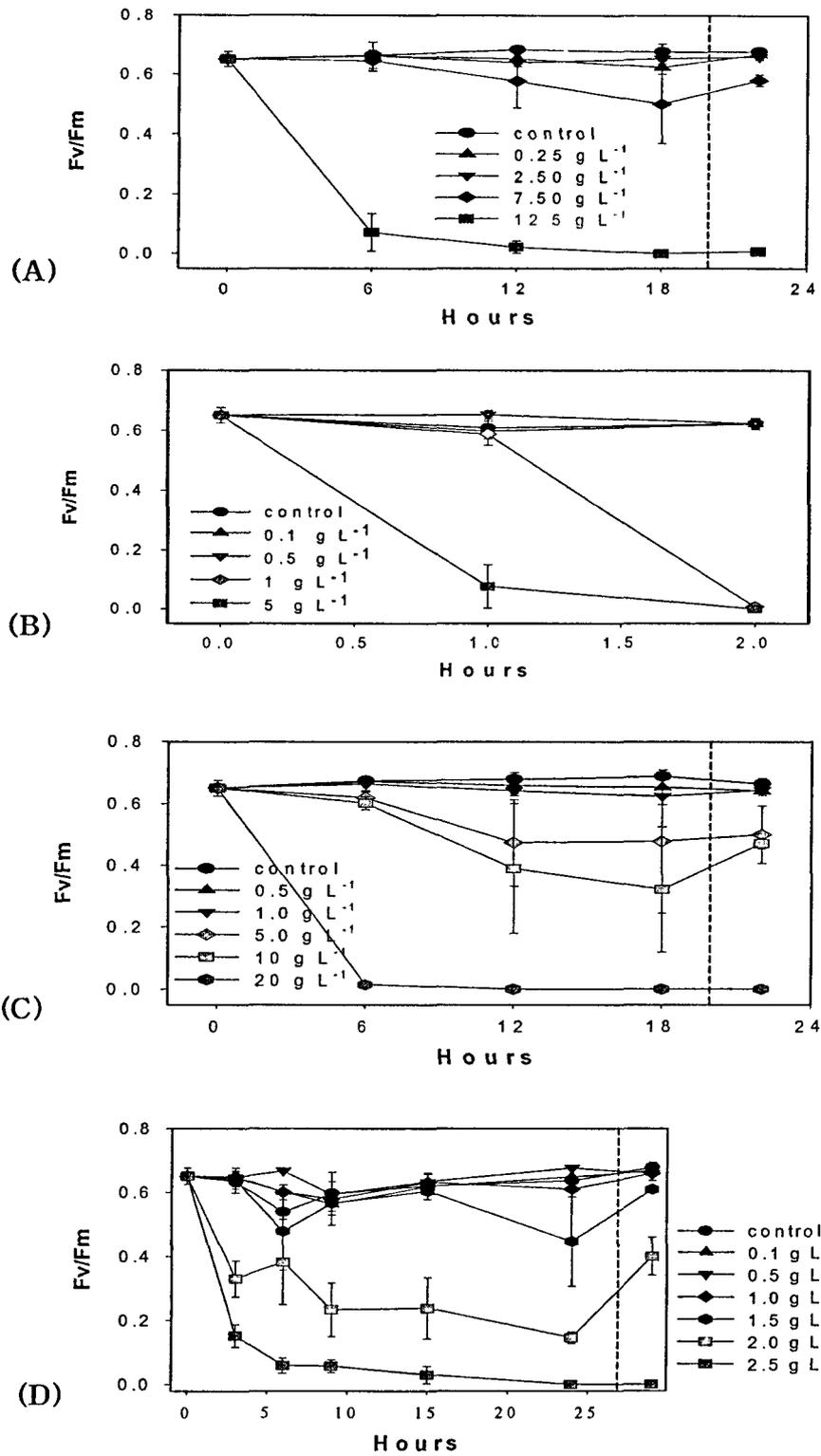


Fig. 3-2-8. Effects of antibiotics on photosynthetic activity and their recovery pattern of *Porphyra* sp.: (A) Erythromycin thiosulfate (Erysulfa), (B) Doxycycline (Doxivet), (C) Erythromycin thiosulfate (Erythromycin) and (D) Oxytetracycline (OTC-24).

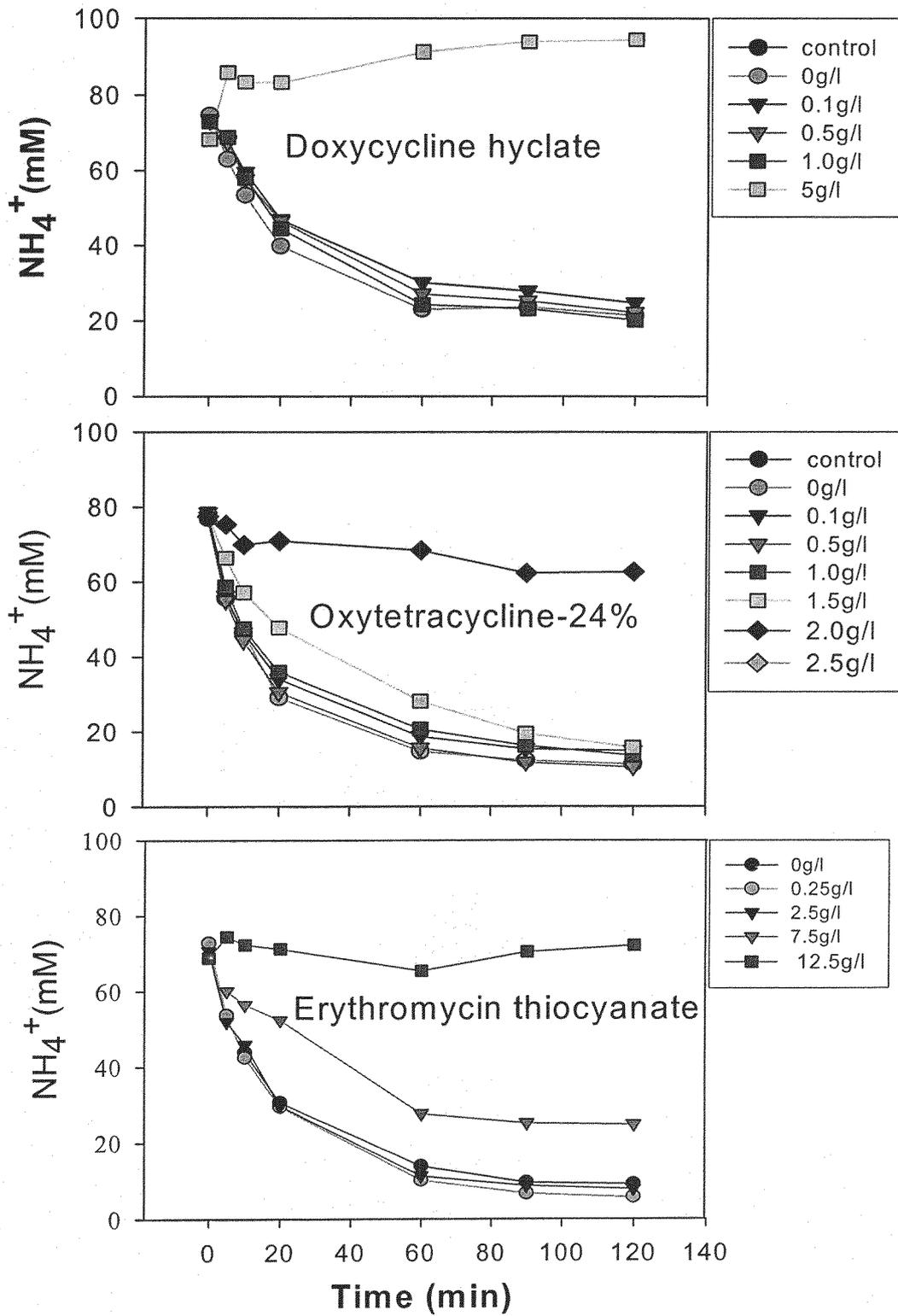


Fig. 3-2-10. The uptake pattern of NH_4 after antibiotics treatment of *Porphyra* sp.: Doxycycline (Doxivet), Oxytetracycline (OTC-24), and Erythromycin thiocyanate (Erysulfa).

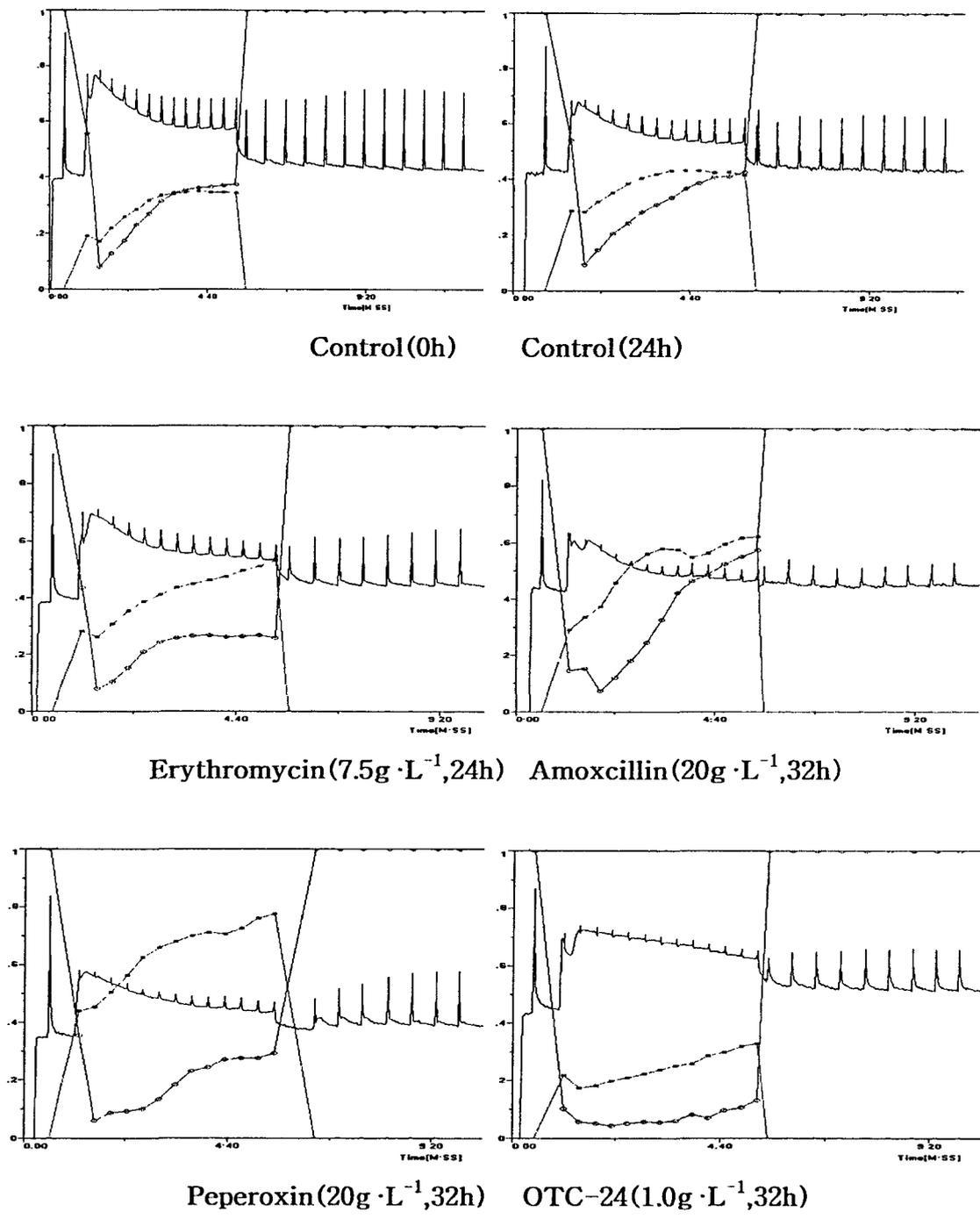


Fig. 3-2-10. Quenching analysis of chlorophyll fluorescence of the antibiotics treated *Porphyra* sp.

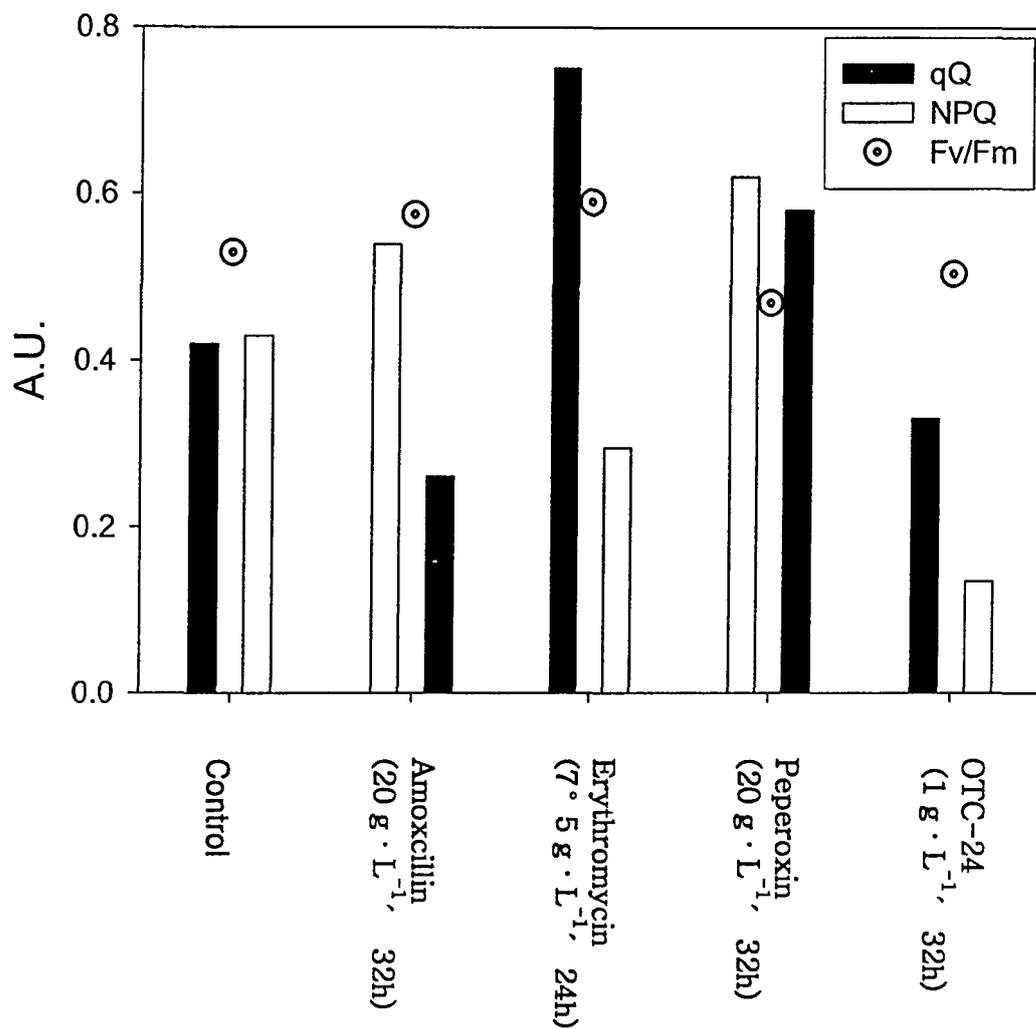


Fig. 3-2-11. Effect of antibiotics on the quenching of the chlorophyll fluorescence of *Porphyra* sp.

(나) 대상 해조 종의 생활사에 따른 생식 계절성 연구와 복합양식 시스템 적용 방안 연구

(1) 양식장 주변 해역 해양환경의 모니터링과 해조 생육상황 월별 조사

여수 주변의 어패류 양식장과 보돌바다의 수질을 비교 조사하였다(Fig. 3-1-1). 각 정점별 수온, 염분, pH, 용존산소, COD, 엽록소 *a* 함량, 질산염(NH₄, NO₂, NO₃), 총인, 규산염 농도를 격월로 조사 분석하였다(Figs 3-2-12 ~ 24). 일반적으로 대조구인 보돌바다의 수질이 어패류 양식장 해역보다 양호하였다(Figs 3-2-12 ~ 24).

해조 생육상 조사는 피도를 바탕으로 분석하였다. 조간대 야생 유점 해조종들의 변동 양상은 파래가 연간 우점하였고 겨울에는 갈조류인 모자반, 미역의 피도가 높게 나타났다. 봄과 가을에 홍조류의 생육 피도가 높게 나타났다(Fig. 3-2-25).

(2) 우점 해조 종에 대한 영양염 흡수율 파악

김과 파래의 암모니움 흡수 경향은 실험 농도 구간에서 NH₄⁺ 농도가 높아질수록 흡수 능력이 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한 김과 파래의 암모니움 흡수율은 실험 농도 구간에서 초기 0 ~ 20분 동안 높게 나타나는 surge uptake를 보였다(Table 3-2-1).

통영만 부근에서 채집한 잎꼬시래기(*Gracilaria textorii*), 도박(*Pachmeniopsis elliptica*), 구멍갈파래(*Ulva pertusa*), 쌍발분홍치(*Rhododymenia intricata*), (*Grateloupia livida*), 마디잘록이(*Lomentaria catenata*)에서 NH₄⁺ 흡수율은 실험 구간에서 가장 높은 150 μM 일 때 가장 높은 경향을 보였다(Table 3-2-2). 부산 연안(청사포)에서 채집한 잎꼬시래기(*Gracilaria textorii*), 꼬시래기(*Gracilaria verrucosa*), 가시우무(*Hypnea charoides*), (*Chondrus ocellatus*)는 실험 구간의 다른 농도에 비해 NH₄⁺ 75 μM 일 때 비교적 높은 흡수율을 나타냈다(Table 3-2-3).

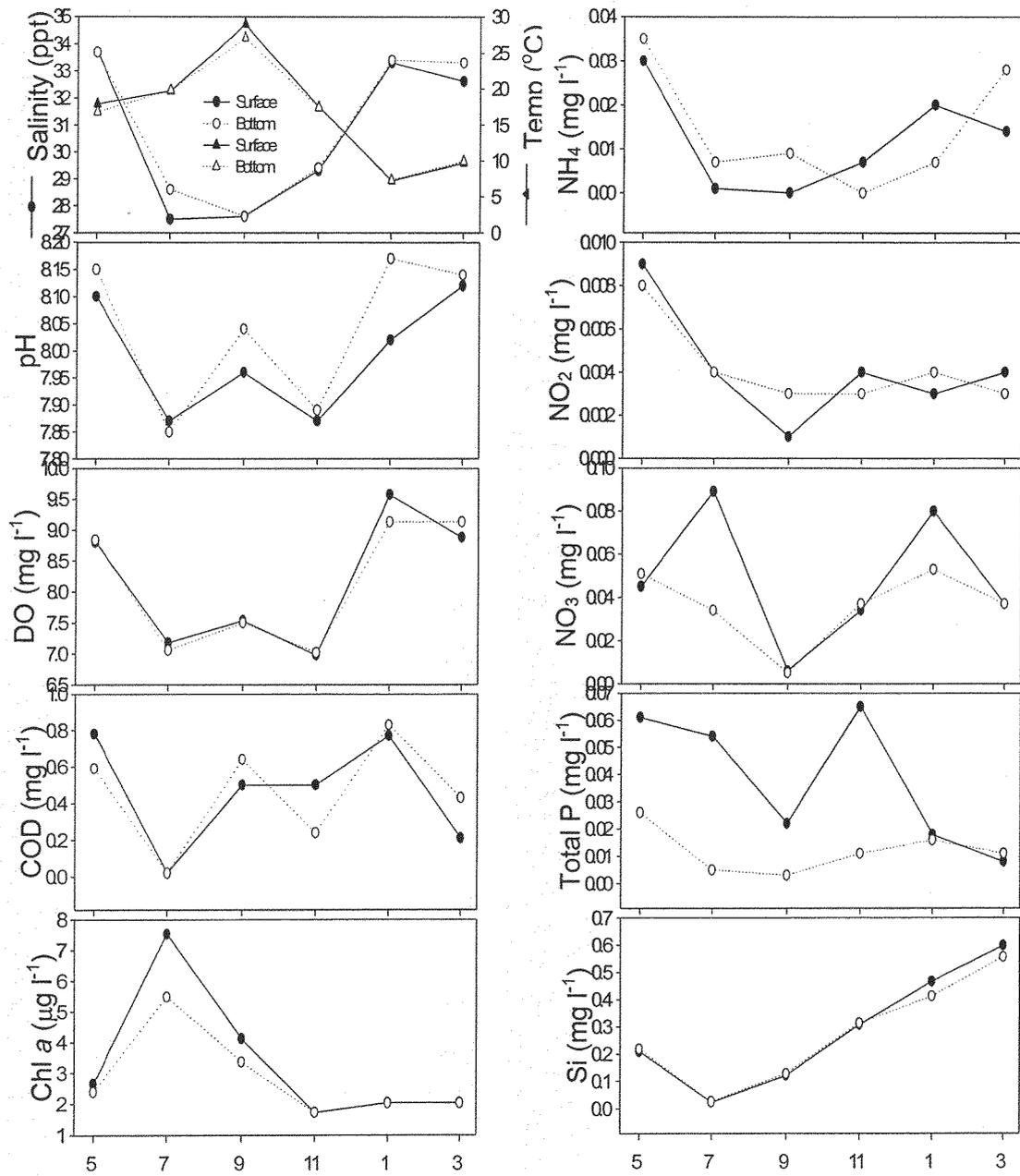


Fig. 3-2-12. The changes of several water quality factors at Bodolbada site as a reference site (★ in Fig. 4-1) during the study period in 2003/4.

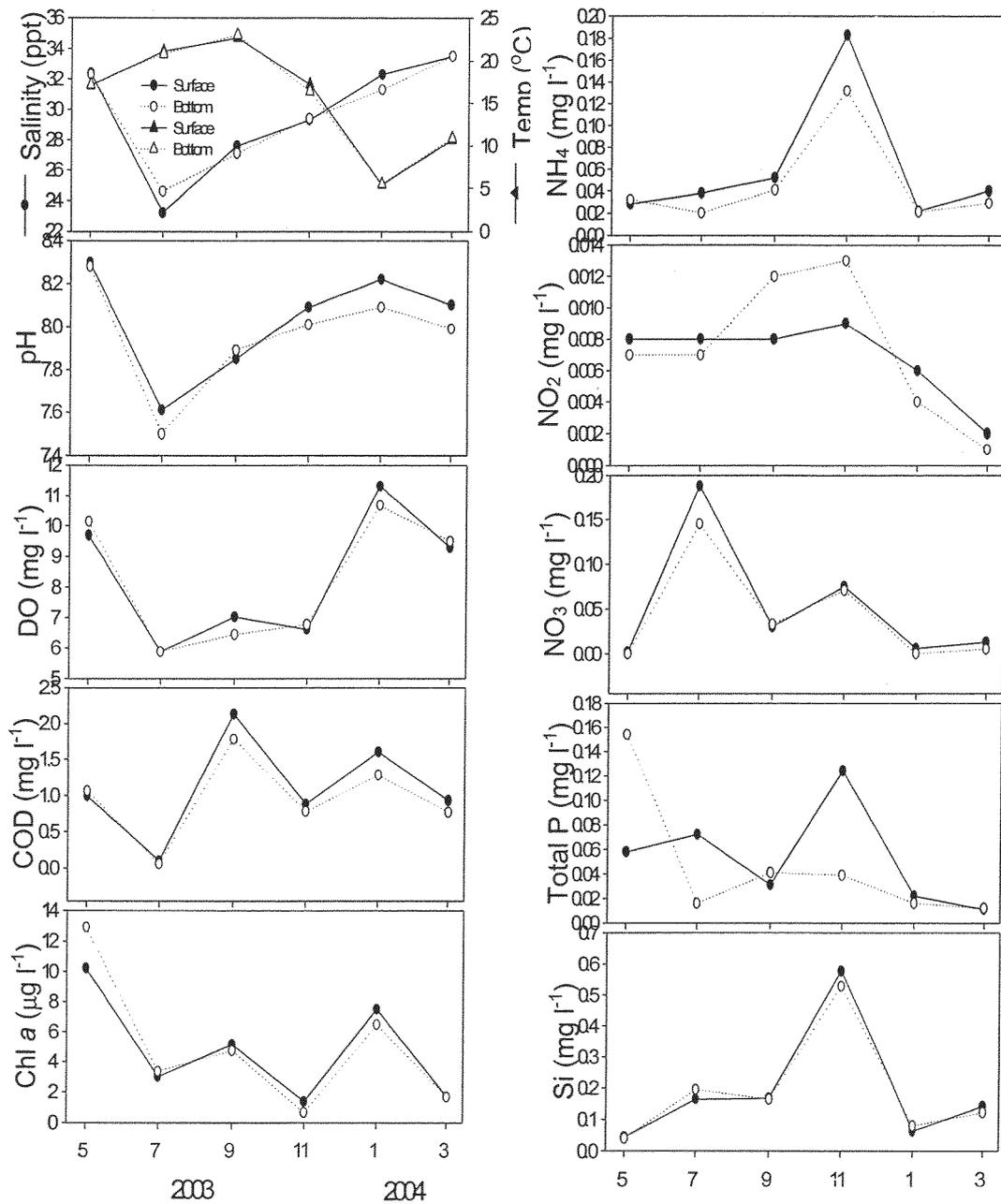


Fig. 3-2-13. The changes of several water quality factors at the finfish aquaculture area, Dolsandaeygo (●1 in Fig. 4-1) in Yosu during the study period in 2003/4.

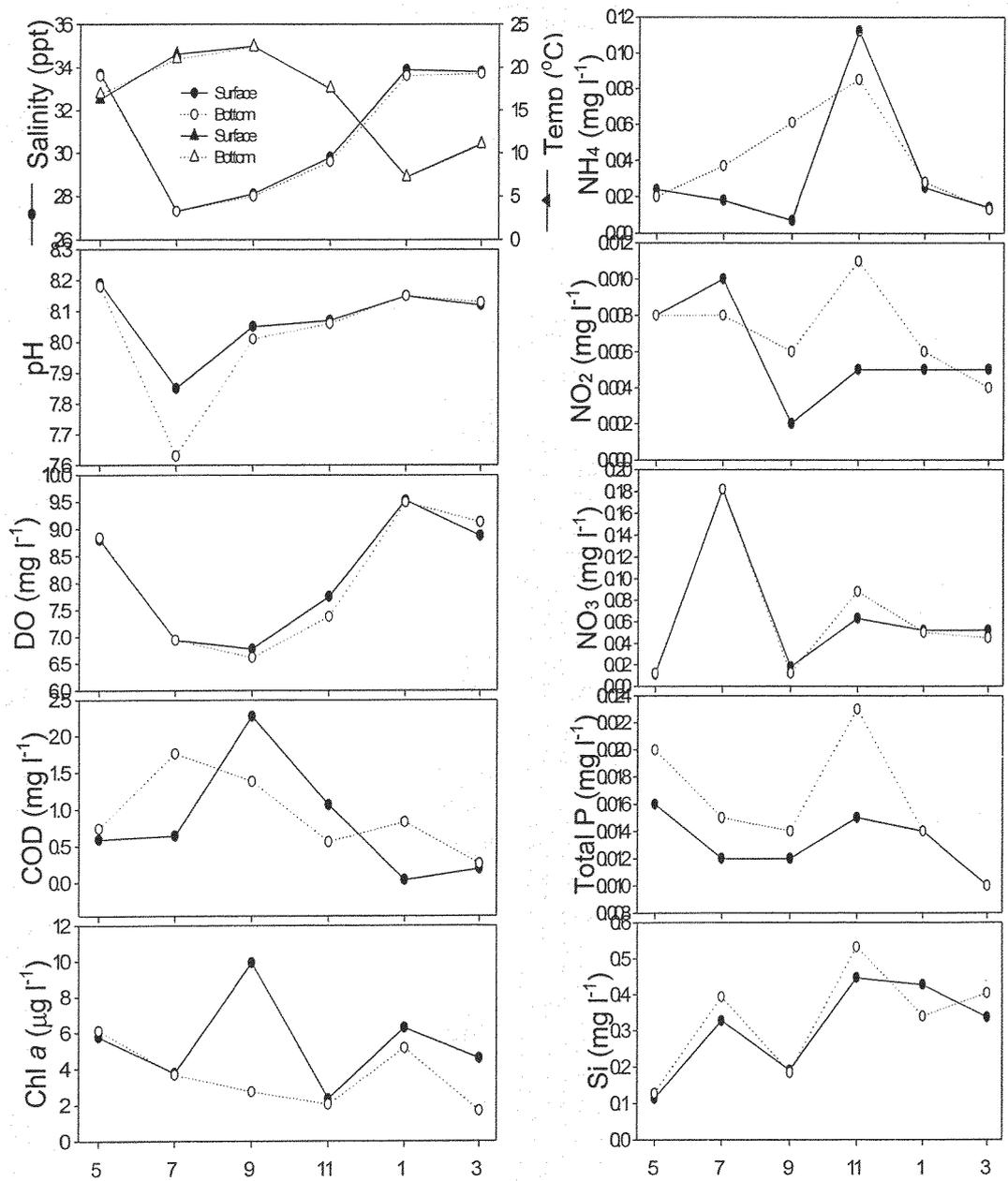


Fig. 3-2-14. The changes of several water quality factors at the finfish aquaculture area, Geumbong (●2 in Fig. 4-1) in Yosu during the study period in 2003/4.

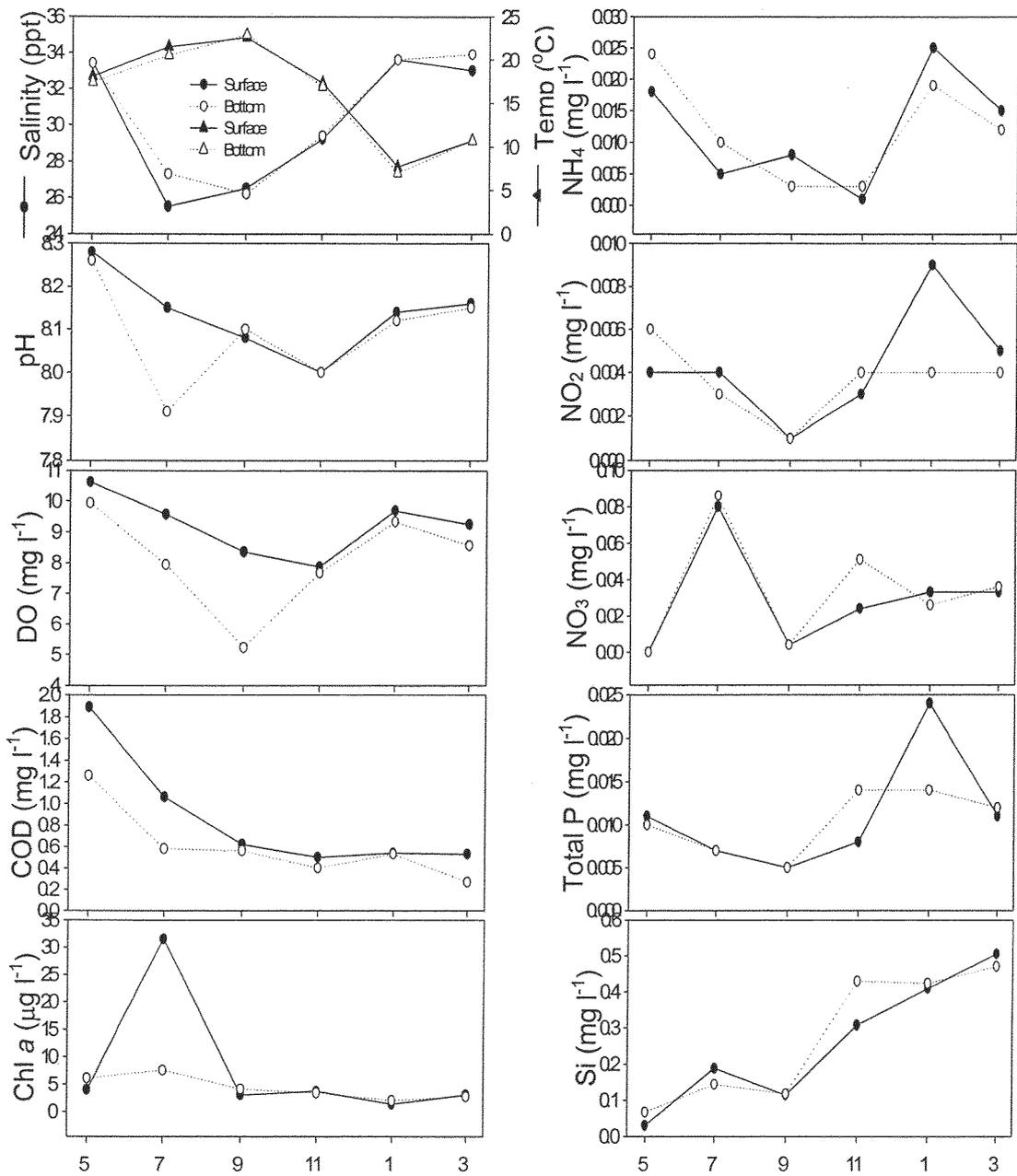


Fig. 3-2-15. The changes of several water quality factors at the fish aquaculture area, Baekya (●3 in Fig. 4-1) in Yosu during the study period in 2003/4.

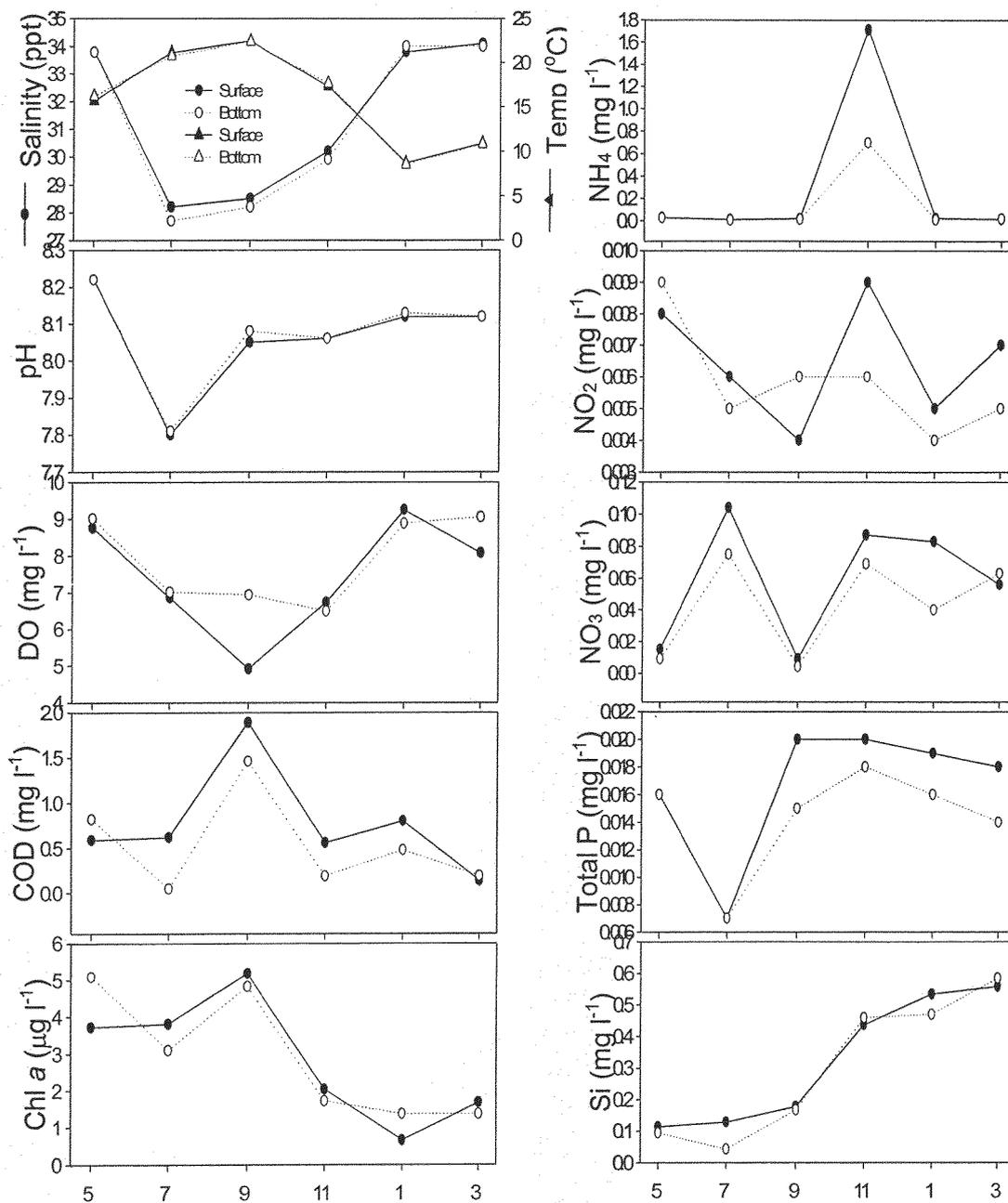


Fig. 3-2-16 The changes of several water quality factors at the finfish aquaculture area, Hwatae (●4 in Fig. 4-1) in Yosu during the study period in 2003/4.

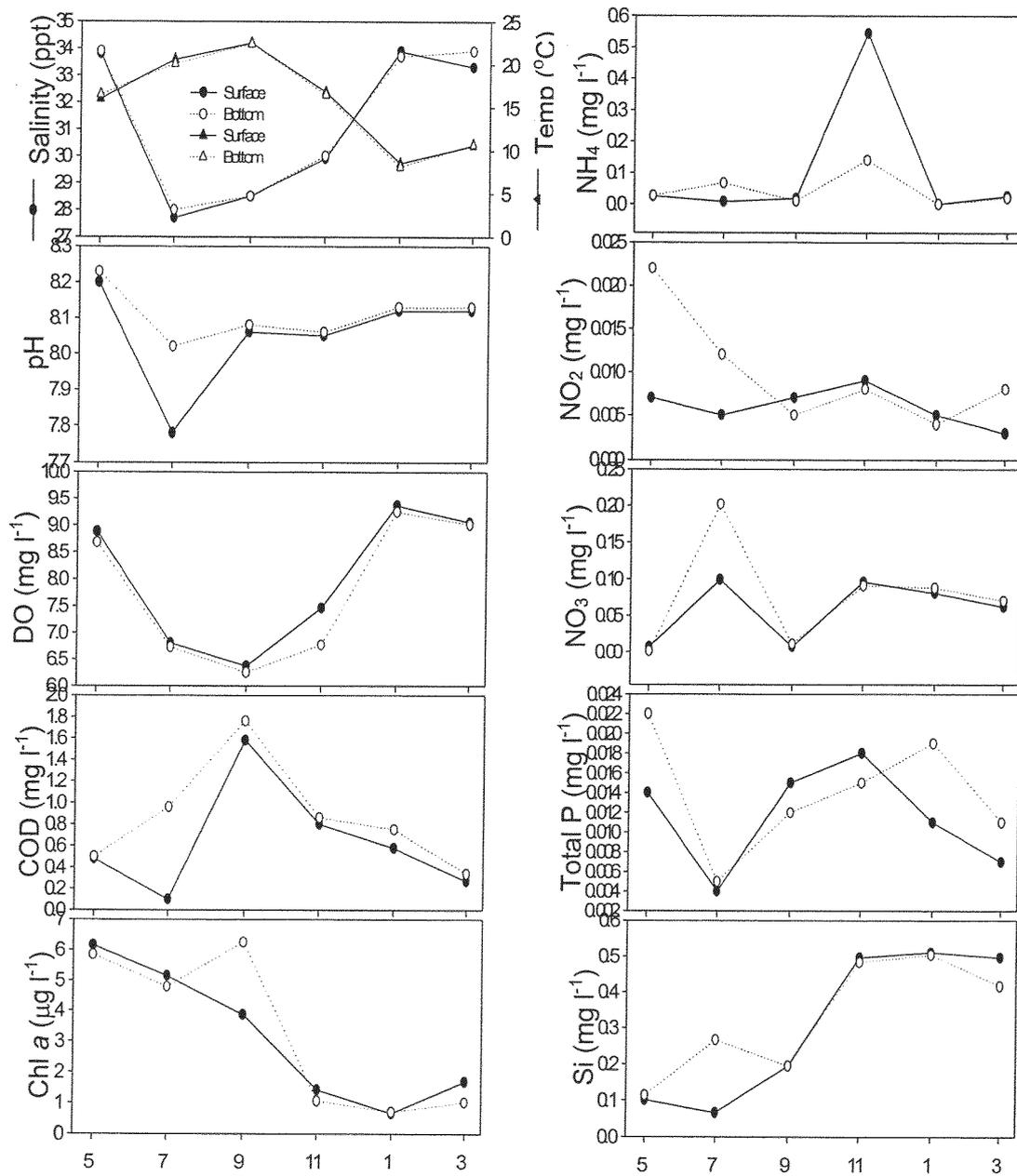


Fig. 3-2-17. The changes of several water quality factors at the finfish aquaculture area, Weolhang (●5 in Fig. 4-1) in Yosu during the study period in 2003/4.

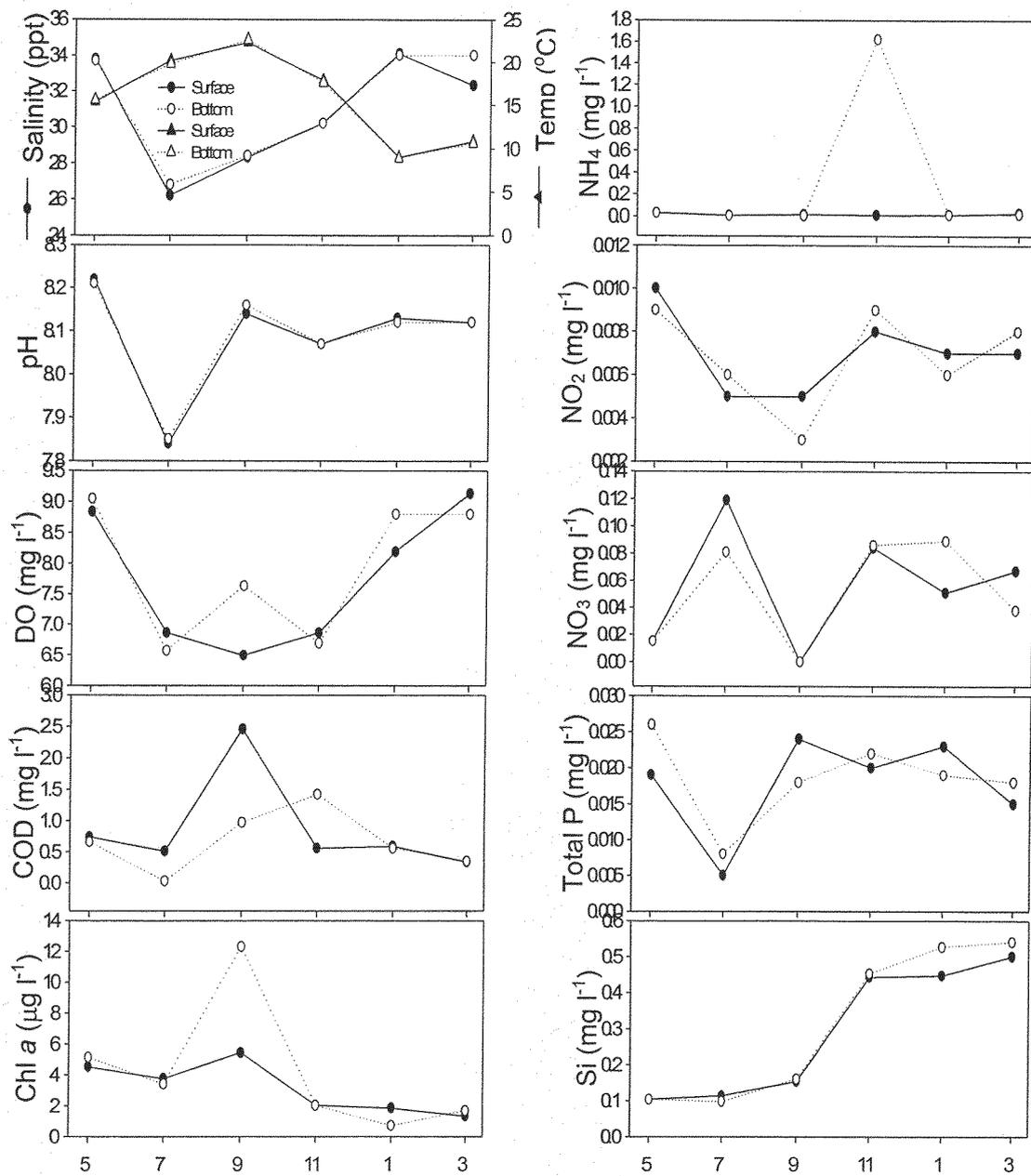


Fig. 3-2-18. The changes of several water quality factors at the finfish aquaculture area, Daedoora (●6 in Fig. 4-1) in Yosu during the study period in 2003/4.

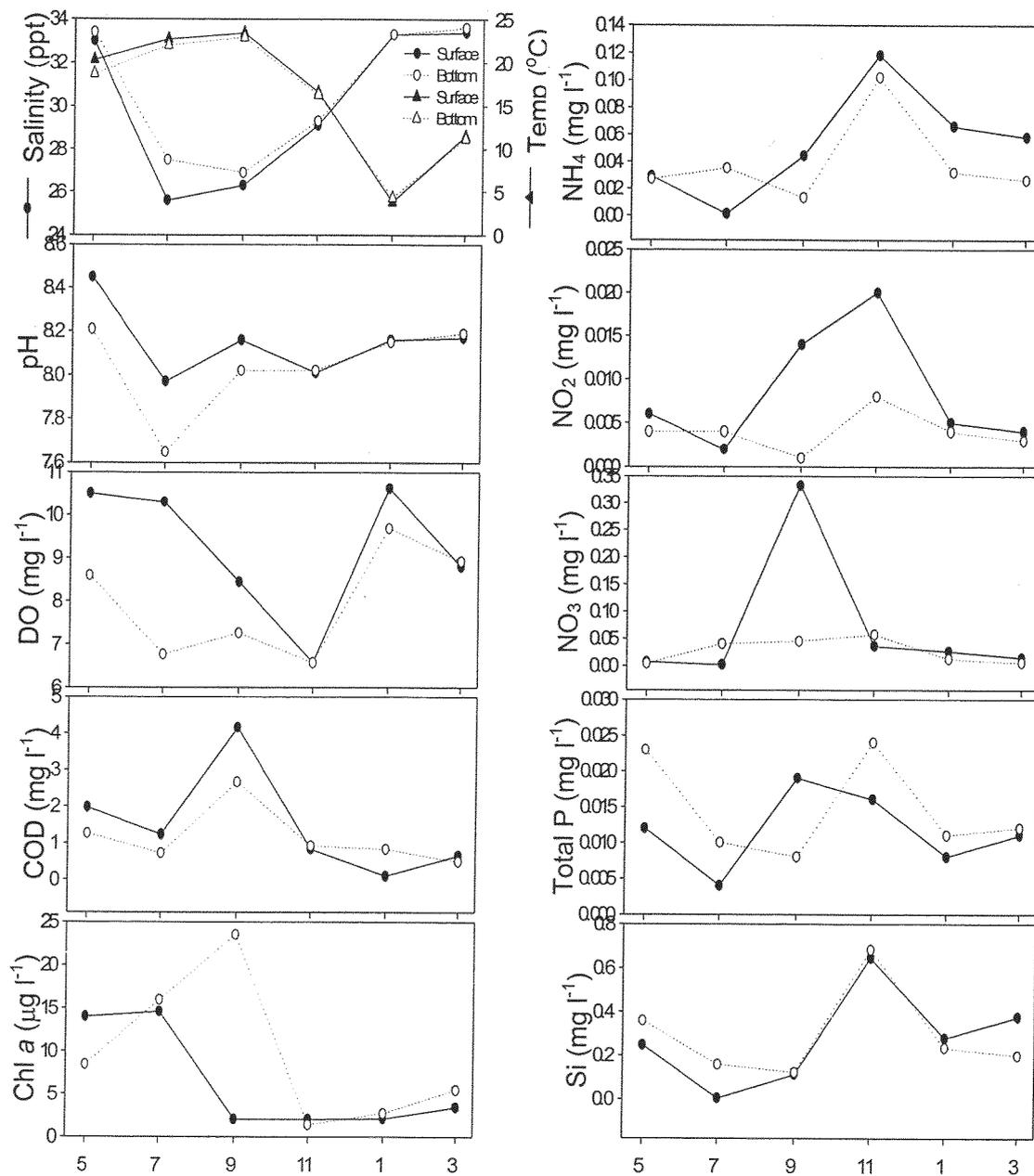


Fig. 3-2-19. The changes of several water quality factors at the shellfish (*Mytilus galloprovincialis*, mussel) aquaculture area, Soho (Δ 1 in Fig. 4-1), in Yosu during the study period in 2003/4.

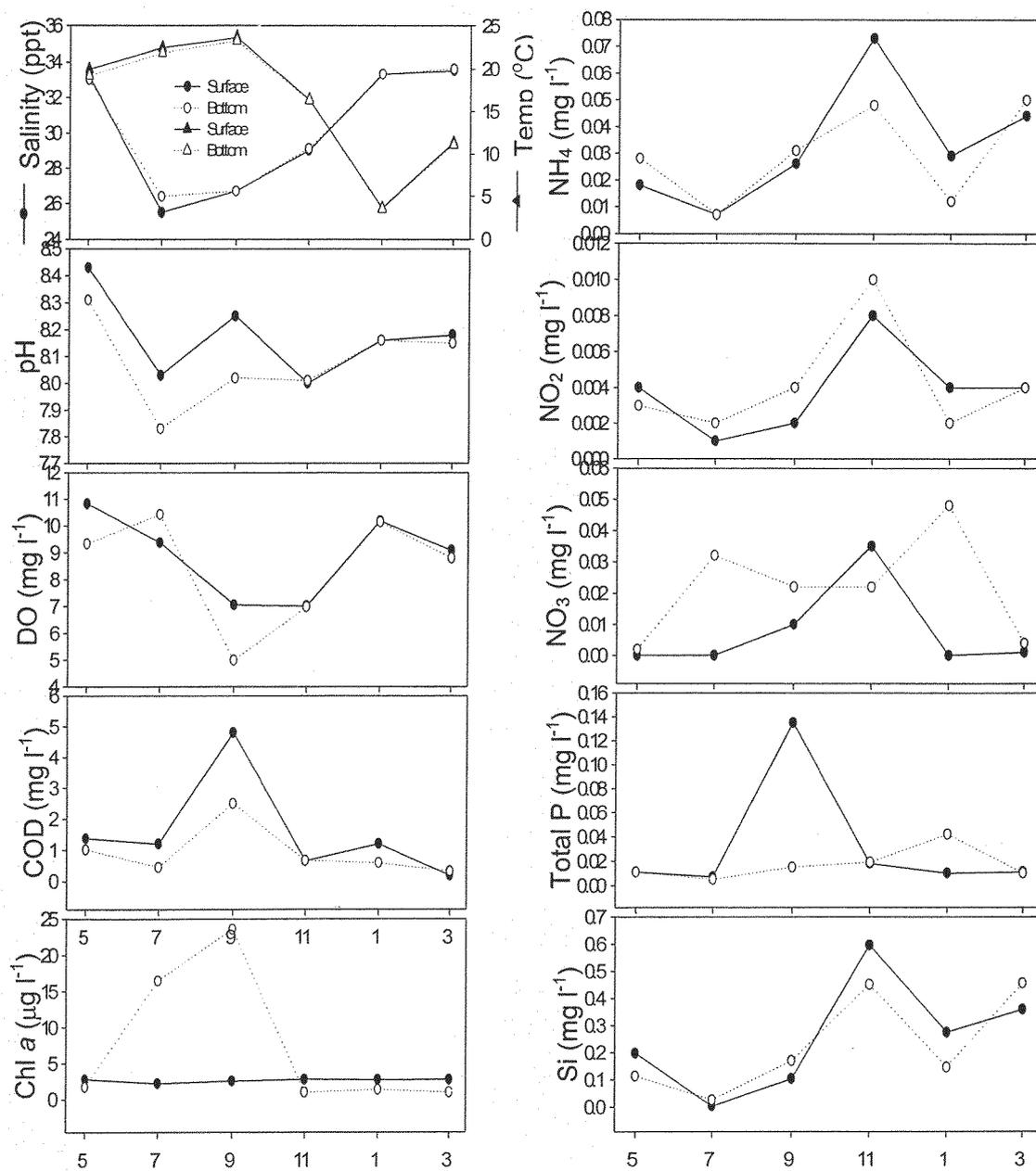


Fig. 3-2-20. The changes of several water quality factors at the shellfish (*Mytillus galloprovincialis*, mussel) aquaculture area, Songso (Δ2 in Fig. 4-1), in Yosu during the study period in 2003/4.

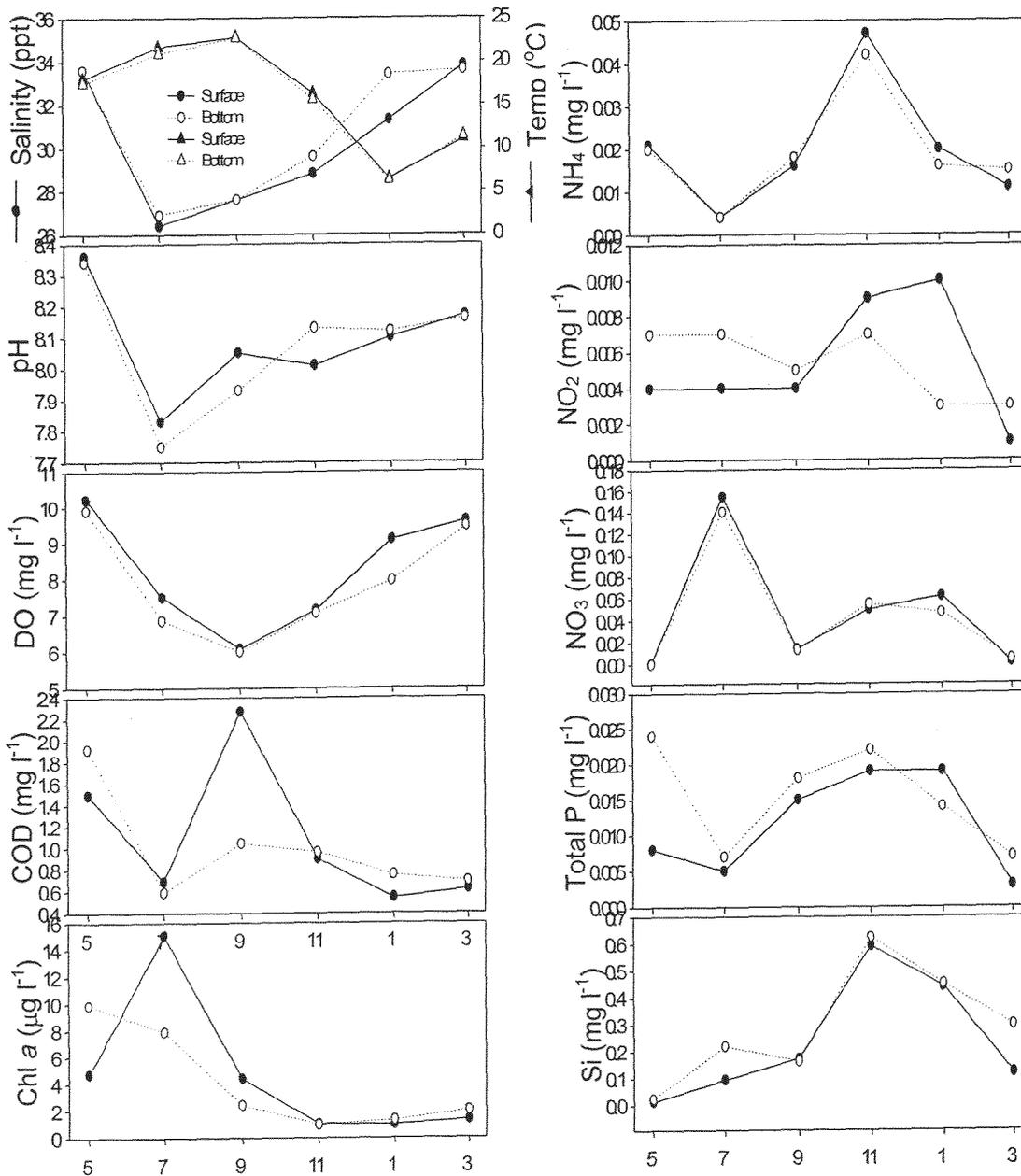


Fig. 3-2-21. The changes of several water quality factors at the shellfish (*Crassostrea gigas*, oyster) aquaculture area, Gamakseom (■1 in Fig. 4-1), in Yosu during the study period in 2003/4.

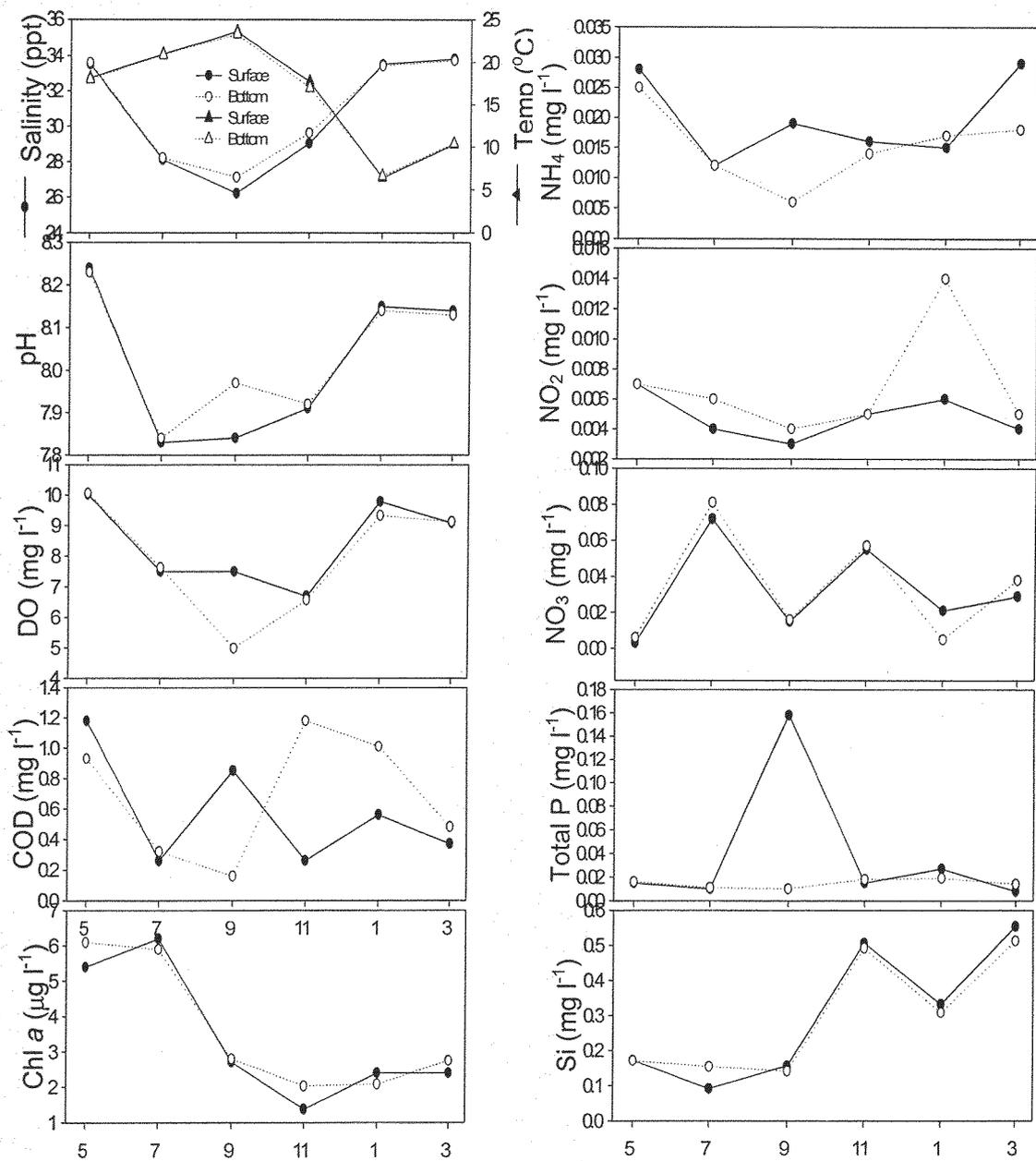


Fig. 3-2-22. The changes of several water quality factors at the shellfish (*Crassostrea gigas*, oyster) aquaculture area, Jangsoo (■2 in Fig. 4-1), in Yosu during the study period in 2003/4.

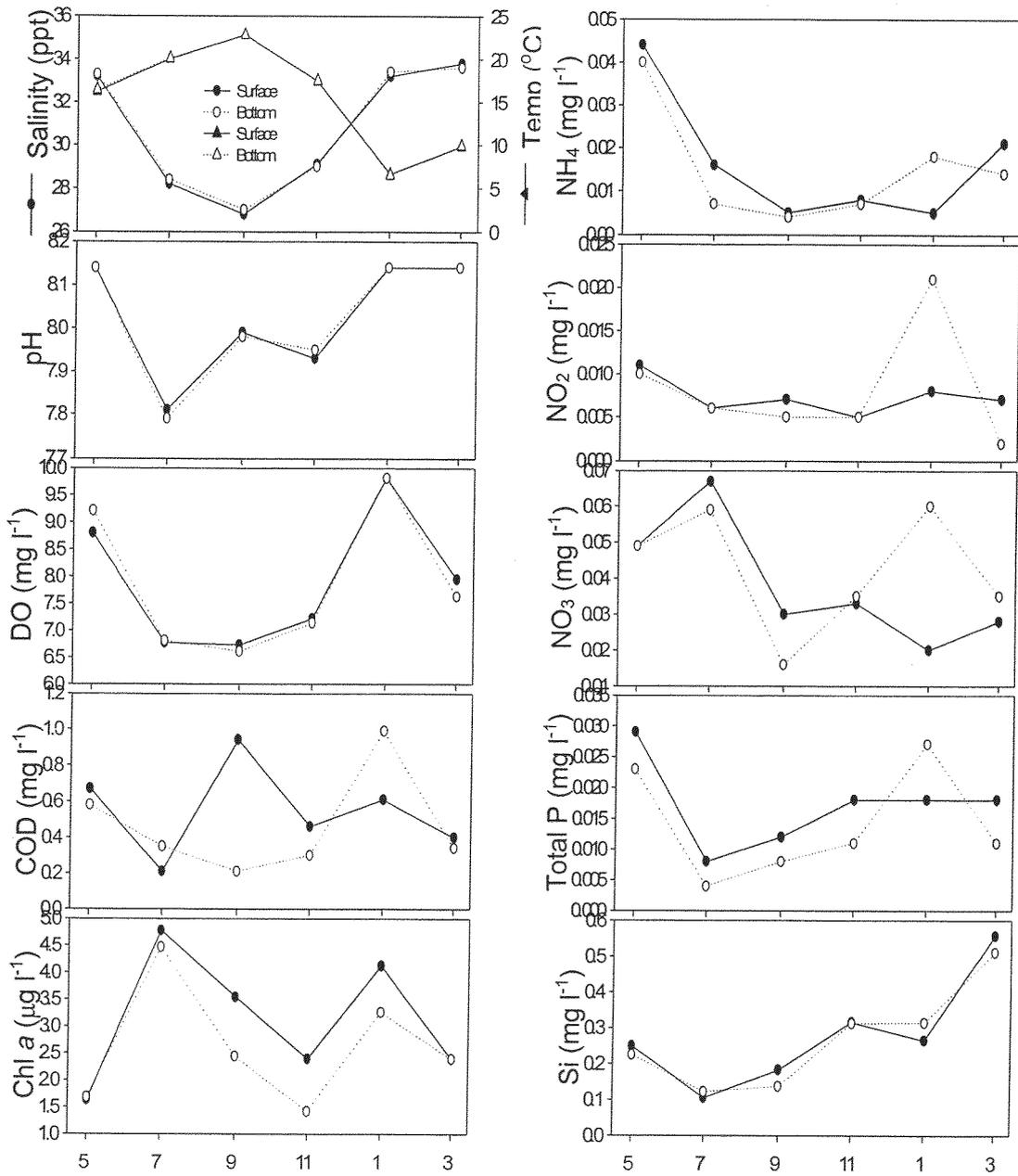


Fig. 3-2-23. The changes of several water quality factors at the shellfish (*Scapharca brougtonii*, ark shell) aquaculture area, Gyupo (◆ in Fig. 4-1) in Yosu during the study period in 2003/4.

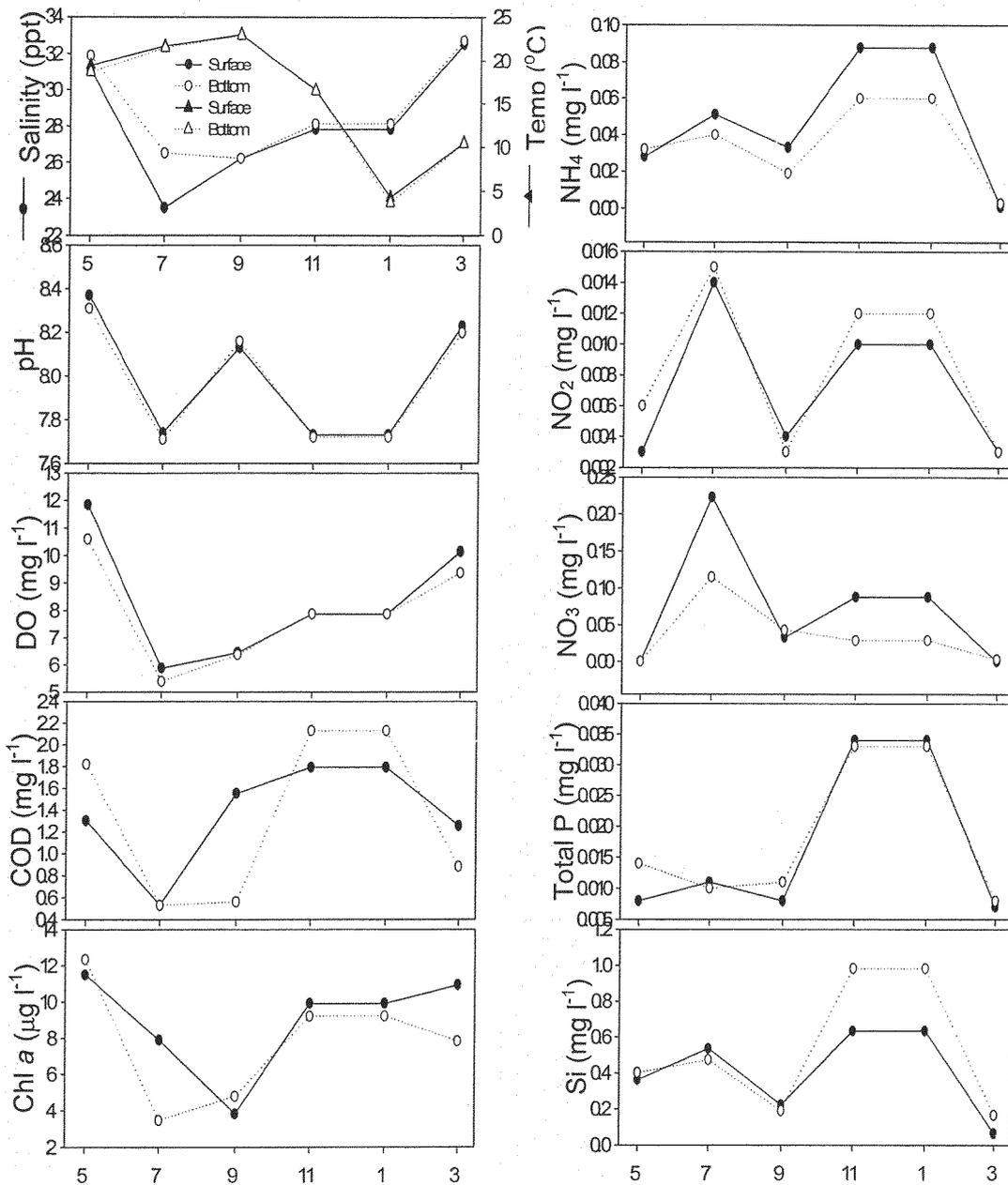


Fig. 3-2-24. The changes of several water quality factors at the shellfish (*Scapharca brougtonii*, ark shell) aquaculture area, Gyupo (◆ in Fig. 4-1) in Yosu during the study period in 2003/4.

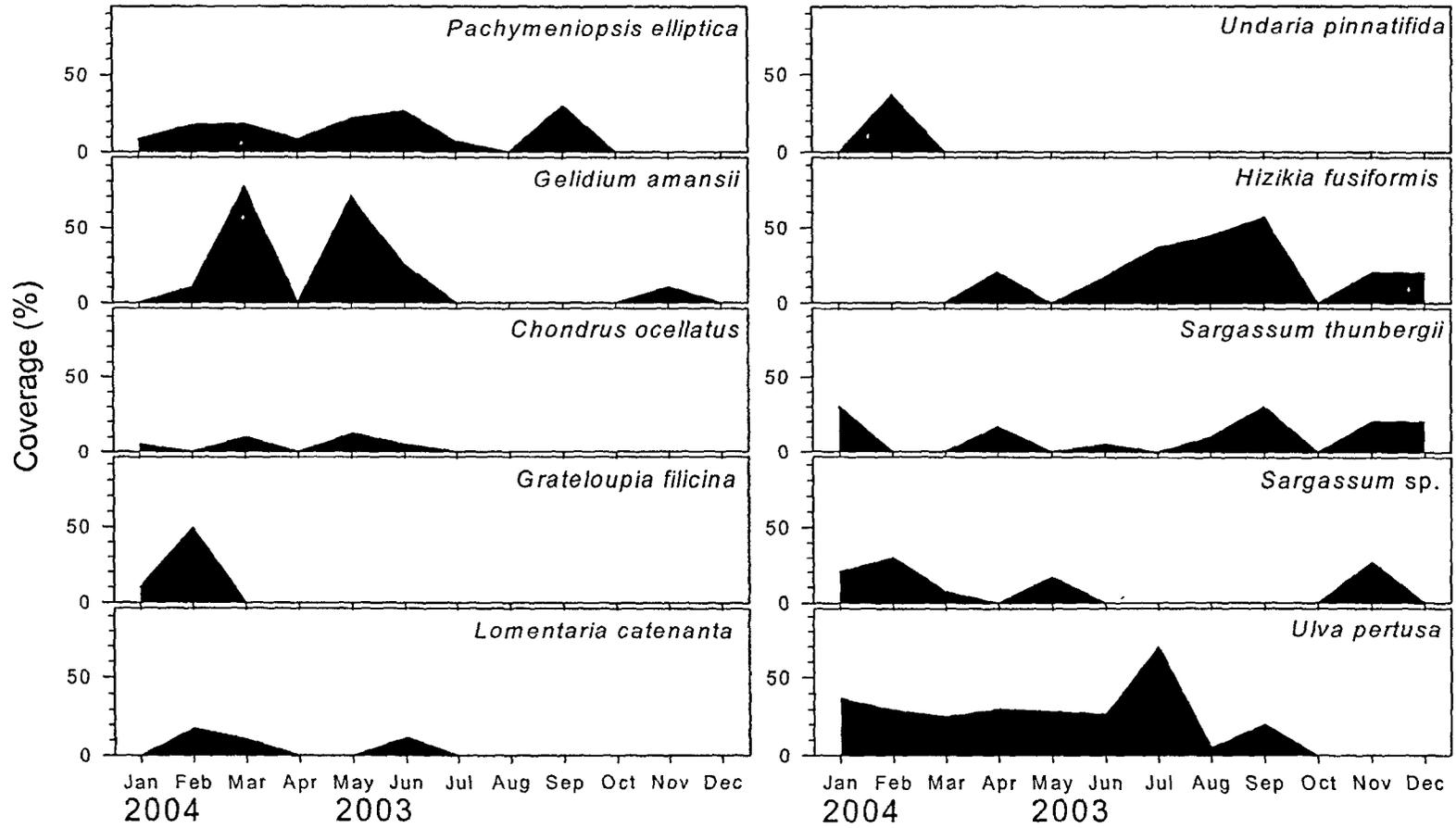


Fig. 3-2-25. The changes of coverage of donimant intertidal seaweed species in the South Sea during the study period of from May 2003 to April 2004.

◎ 기반 조성단계 추가 실험- 하계 종 선별 기술 개발

여름철 복합양식 대상 종 선별을 위해 여름철에 생육하는 청각(*Codium fragile*)을 대상으로 여름철 수온과 어류 생육 적정 수온을 고려하여 다양한 수온과 빛 조건하에서 암모니움 흡수 능력을 조사하였다. NH_4^+ 농도가 300 μM 일 때, 광 조건이 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 25 °C에서 6시간 지난 후 41 μM 으로 감소하였고, 20 °C에서 83.87 μM , 15 °C에서 125.26 μM , 10 °C에서 173 μM 으로 감소하여 온도가 가장 높았던 25 °C에서 암모니움 농도가 가장 많이 감소하였다. 광도 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 조건, 25 °C에서 131 μM , 20 °C에서 158 μM , 15 °C에서 217 μM , 10 °C에서 259 μM 으로 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서도 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 와 같이 수온이 높은 조건이 낮은 조건보다 암모니움 농도가 더 감소하였으나, $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 조건에서 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 보다 청각의 암모니움 흡수가 더 활발하게 나타난 것을 알 수 있었다. 빛이 없는 암 조건에서는 25 °C일 때 155 μM , 20 °C에서 175 μM , 15 °C에서 232 μM , 10 °C에서 227 μM 으로 빛이 있는 조건에서와 마찬가지로 25 °C에서 배양액의 암모니움 농도가 가장 많이 감소하였지만, 빛이 있는 조건에 비해 청각의 암모니움 흡수는 다소 적게 일어나는 경향을 나타냈다(Fig. 3-2-26A).

150 μM NH_4^+ 농도 조건의 경우 광 조건이 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 25 °C에서 29 μM 으로, 20 °C에서 0 μM , 15 °C에서 3 μM , 10 °C에서 47 μM 으로 감소하였고, $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 조건, 25 °C에서 25 μM , 20 °C에서 30 μM , 15 °C에서 43 μM , 10 °C에서 60 μM 으로 감소하였다. 그리고 빛이 없는 암 조건에서는 25 °C일 때 47 μM , 20 °C에서 48 μM , 15 °C에서 62 μM , 10 °C에서 102 μM 으로 20, 25 °C에서 NH_4^+ 농도가 가장 많이 감소하였다(Fig. 3-2-26B).

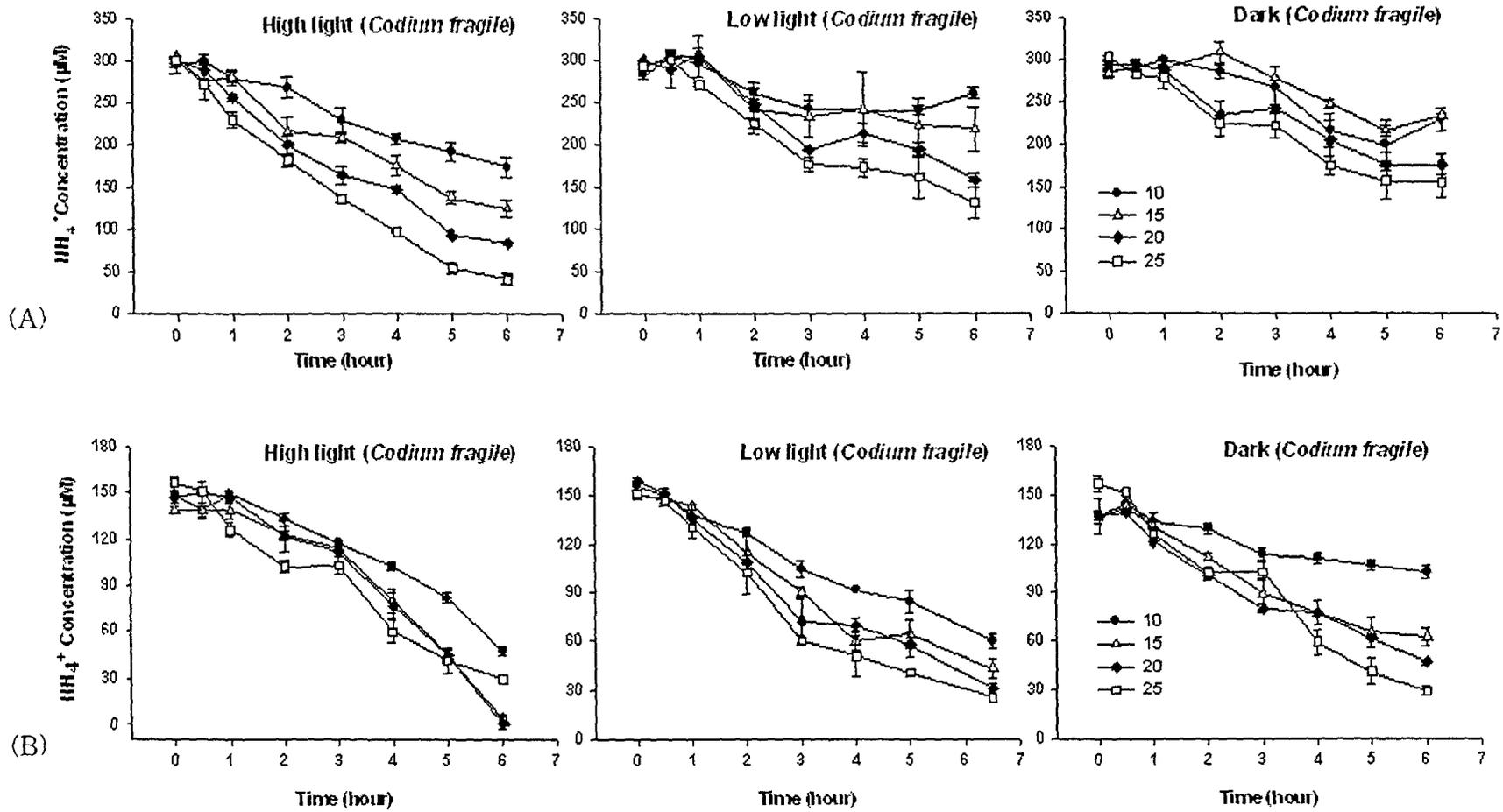


Fig. 3-2-26. A plot of ammonium concentration decrease at the various combinations of light and temperature (A) in the added initial concentration of 150 μM; (B) 300 μM with 2g of *Codium fragile* in 100ml seawater.

10 ~ 25 °C에서 청각의 암모니움 흡수율은 전체적으로 150 μM 에서 보다 300 μM 에서 더 높게 나타났다(Table 3-2-5). 두 농도에서 모두 수온이 낮은 10 °C와 15 °C에서 $0.09 \pm 0.03 \sim 0.34 \mu\text{mol} \cdot \text{dw} \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 와 $0.14 \pm 0.01 \sim 0.45 \pm 0.03 \mu\text{mol} \cdot \text{dw} \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 으로 나타났으며, 20 °C와 25 °C에서는 $0.21 \pm 0.01 \sim 0.50 \pm 0.01 \mu\text{mol} \cdot \text{dw} \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 과 $0.22 \pm 0.01 \sim 0.57 \pm 0.01 \mu\text{mol} \cdot \text{dw} \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 로 20 °C 이상의 수온에서 흡수율이 높게 나타났다. 그러므로 청각의 온도에 따른 암모니움 흡수는 빛 조건이 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하에서보다 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 뚜렷한 차이를 보였다(Table 3-2-6).

암모니움 흡수가 일어나기 전과 후 청각의 생리적이 상태를 파악하기 위해서 광합성 효율을 측정하였다. 빛 조건 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 암모니움 흡수 실험 전의 청각의 광합성 효율(f_v/f_m)은 $0.786 \sim 0.70$ 였고, 하루가 지난 후의 f_v/f_m 은 $0.428 \sim 0.226$ 으로 감소하는 경향을 보였고, $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 조건에서는 흡수 전 f_v/f_m 이 $0.727 \sim 0.649$ 와 후 $0.715 \sim 0.519$ 로 나타났으며, 빛이 없는 조건에서는 f_v/f_m 값이 $0.781 \sim 0.734$ 로 하루가 지난 후 $0.776 \sim 0.752$ 로 실험 전과 후에 큰 변화가 나타나지 않았다(Fig. 3-2-27). 높은 빛 조건에서 청각의 광합성 효율이 크게 떨어지는 것을 알 수 있었다.

Table 3-2-5. Effect of water temperature on the NH_4^+ uptake rate and retention of *Codium fragile*

Temperature (°C)	Uptake rate ^{0-360min} ($\mu\text{mols dw g}^{-1} \text{ min}^{-1}$)	Retention (%)
Ammonium concentration 150 μM		
10	0.211 \pm 0.01	68.12
15	0.278 \pm 0.01	97.48
20	0.320 \pm 0.01	99.48
25	0.257 \pm 0.04	81.26
Ammonium concentration 300 μM		
10	0.341 \pm 0.00	41.14
15	0.453 \pm 0.03	58.85
20	0.499 \pm 0.01	71.90
25	0.573 \pm 0.01	86.29

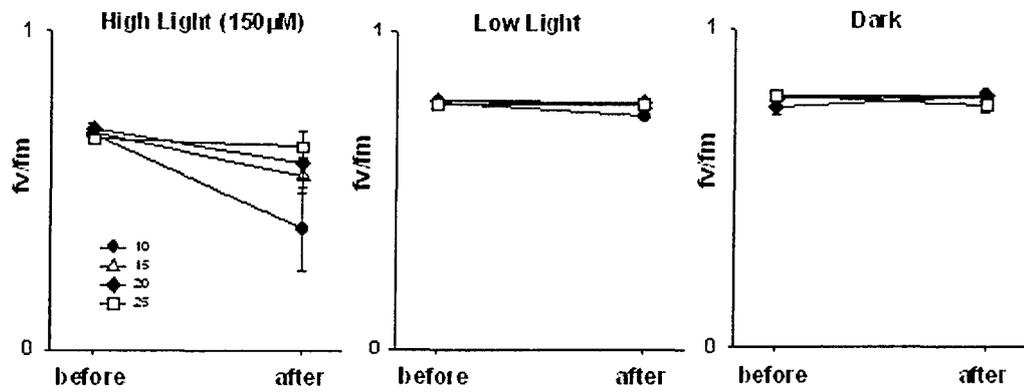
Data show mean \pm SE (n=3)

Table 3-2-6. Effect of irradiance on the NH_4^+ uptake rate and retention of *Codium fragile*

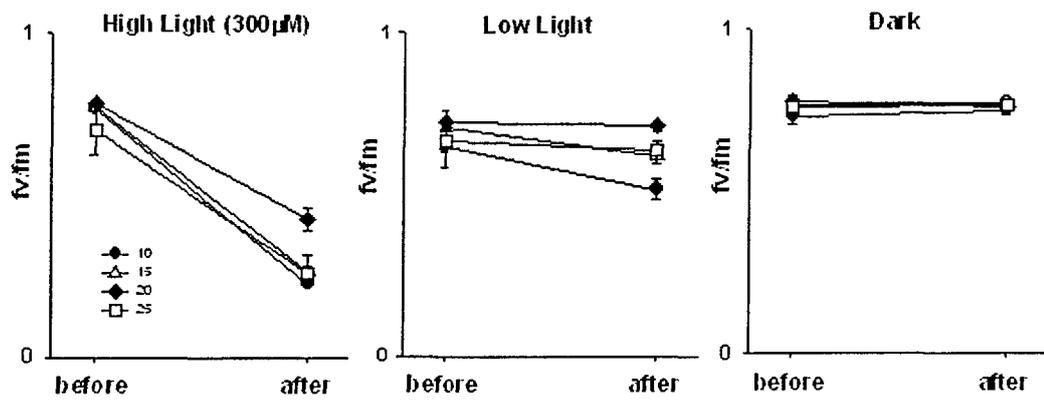
Irradiance ($\mu\text{mol m}^2\text{s}^{-1}$)	Uptake rate ^{0-360min} ($\mu\text{mols dw g}^{-1} \text{ min}^{-1}$)	Retention (%)
Ammonium concentration 150 μM		
100	0.320 \pm 0.01	99.48
10	0.207 \pm 0.02	80.39
0	0.264 \pm 0.01	65.44
Ammonium concentration 300 μM		
100	0.499 \pm 0.01	71.90
10	0.293 \pm 0.01	46.84
0	0.264 \pm 0.03	40.10

Data show mean \pm SE (n=3)

(A)



(B)



(fv/fm: variable fluorescence/maximum yield of fluorescence)

Fig. 3-2-27. The changes of Fv/Fm at the various combinations of light, temperature and NH₄⁺ concentration; (A) in the added initial concentration of 150 μM, (B) 300 μM.

2. 초기 적용단계: 선정된 종에 대한 중규모 양식 시스템 적용 연구

(가) 대상 해조 종의 중규모 시스템의 생리, 생육 특성 연구

실험실 규모에서 보다 큰 중규모 수조 시스템을 이용하여 해조류의 암모니움 흡수 양상을 살펴 보았다. 암모니움 표준 용액을 넣어 농도를 맞추어서 암모니움 흡수 양상을 살펴 보았다면, 실제 양식장과 비슷한 환경으로 순환식, 개방식 혼합양식 시스템을 제작하여 어류 수조의 배출수를 이용하여 해조류 정화 능력을 알아보고자 하였다.

(1) 탱크 디자인과 생산/여과 시스템 개발

어류 수조의 배출수는 침전조와 해조류 수조를 거쳐 다시 어류 수조 돌아가는 폐쇄 순환식 여과시스템과 해조류 수조를 거쳐 바로 배출수 되는 개방식 시스템을 디자인하여 해조 복합양식 시스템을 개발하고 효율성을 조사하였다. 본 연구는 여수대학교 돌산도 증양식 센터 있는 수조 시설을 이용하여 여과 시스템을 디자인 하였다.

구멍갈파래의(*Ulva* sp.)와 감성돔(*Acanthopagrus schlegeli*) 수조를 순환식과 개방식 시스템으로 제작하였다. 순환 시스템의 구멍갈파래 수조의 효율은 일평균 NH_4^+ 가 17.38 μM 제거 되었다(Fig. 3-2-28A). 개방 시스템에서는 일평균 NH_4^+ 가 6.81 μM 제거 되었다(Fig. 3-2-28B). 개방 시스템에서는 전체 암모니움 농도가 낮게 유지되었다. 반면, 순환 시스템의 전체 암모니움 농도가 증가하여 나타났다. 이것은 암모니움이 100% 제거 되지 않은 배출수가 재 순환하게 되면서 전체적으로 암모니움 농도가 증가한 것이라고 생각된다. 구멍갈파래의 순환식, 개방식 수조 시스템을 유지하는 동안 현장 설비의 오작동으로 인해 재연성을 얻기 힘들었다.

김(*Porphyra* sp.)과 감성돔의 순환식 복합양식 시스템은 김 수조(0.2ton) 3개와 침전수조 (1ton) 1개, 감성돔 수조(3ton) 1개를 연결하여 해조복합양식 시스템 효율성을 조사하였다. 겨울철의 낮은 수온으로 인해 어류의 생리 활성이 활발하지 못하고 사료를 먹지 않아 전체적으로 배출수의 암모니움 농도는 5.65 ~ 19.59 μM 범위에서 비교적 높지 않게 유지되었다. 3개의 순차적으로 연결된 김 수조를 거치면서 암모니움의 농도는 5.35 ~ 18.32 μM 로 유지 되었다(Fig. 3-2-29).

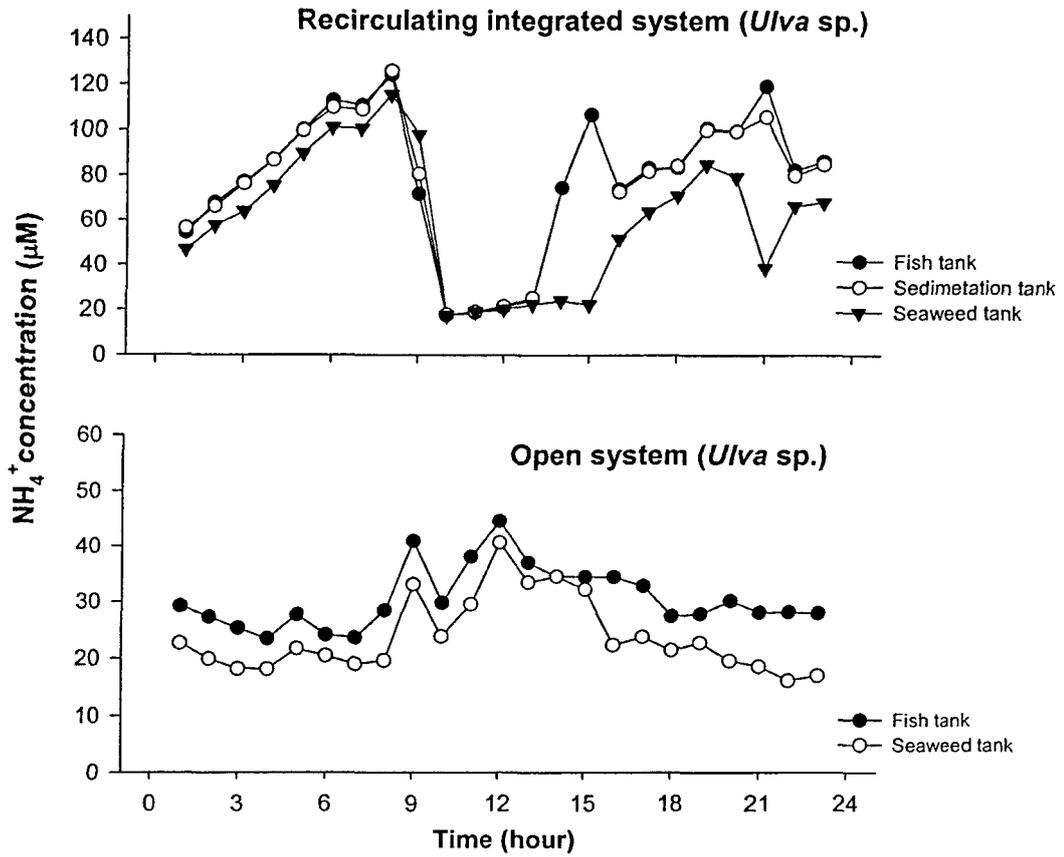


Fig. 3-2-28. The changes of ammonium concentration in the seaweed (*Ulva*) integrated system; (A) Recirculating integrated system, (B) Open system.

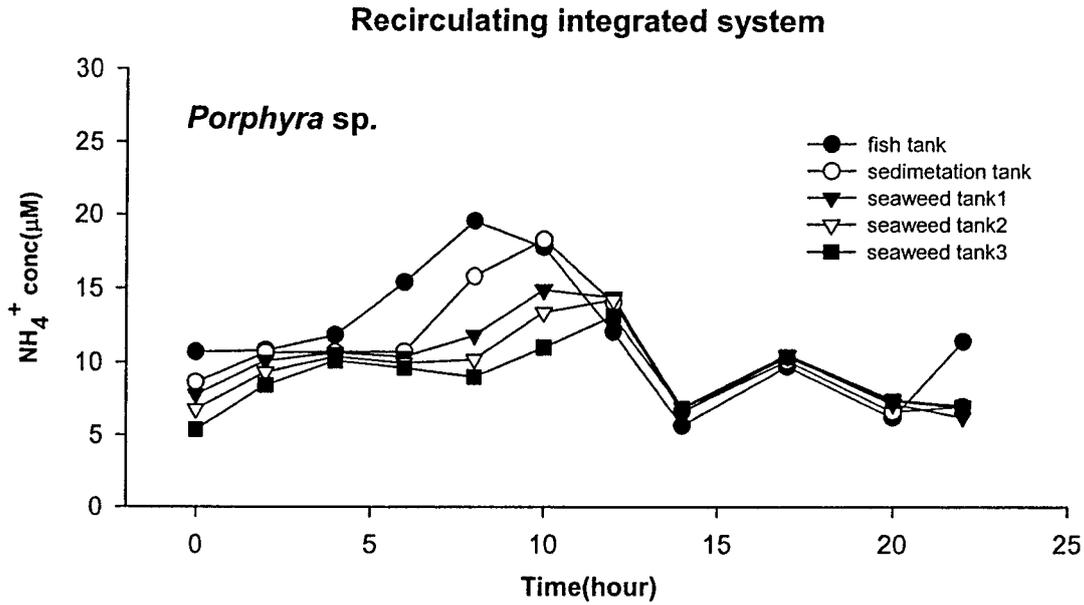


Fig. 3-2-29. The changes of ammonium concentration in the seaweed (*Ulva*) integrated system.

미역(*Undaria pinnatifida*)과 감성돔의 순환식 복합양식 시스템은 위의 김과 감성돔의 순환식 복합양식 시스템과 같은 수조 시설로 영양염 제거 효율을 조사하였다. 김과 감성돔 순환시스템에서와 같이 겨울철 낮은 수온으로 인해 어류의 생리 활성이 활발하지 못하여 전체적으로 암모니움 농도가 낮게 나타났다. 따라서 본 실험에서는 실험에 적용된 해조종의 암모니움 농도가 높은 배출수 수준에서 영양염 제거 효율을 조사하기 위해 각 수조별로 암모니움 표준용액을 넣어 100µM로 맞추어 순환시스템을 작동하였다. 하루 동안의 감성돔 수조의 NH₄⁺ 농도는 111.53 ~ 52.57 µM로 유지되었고, 미역 수조는 83.91 ~ 22.90 µM로 어류 수조보다 낮게 유지되었다(Fig. 3-2-30). 위 미역과 같은 시스템으로 김(*Porphyra sp.*)을 넣었을 때, 어류 수조의 (NH₄⁺) 농도는 107 ~ 68.96 µM로 유지되었으며, 김 수조의 농도는 54 ~ 36.61 µM로 단계별 농도의 차이를 보이면서 유지되었다(Fig. 3-2-30).

다시마(*Laminaria sp.*)와 감성돔 순환시스템에서는 위와 같은 수조 시스템에서 해조 수조를 하나 더 연결하여 어류수조 1개와 침전조 1개, 해조 수조 4개의 순환시스템에서 다시마의 영양염 제거 효율을 조사하였다. 어류수조의 NH₄⁺ 농도는 150.92 ~ 107.85 µM로 유지되었고, 다시마 수조는 138.04 ~ 93.32 µM로 순차적인 단계별 농도의 차이를 보이면서 유지되었다(Fig. 3-2-31).

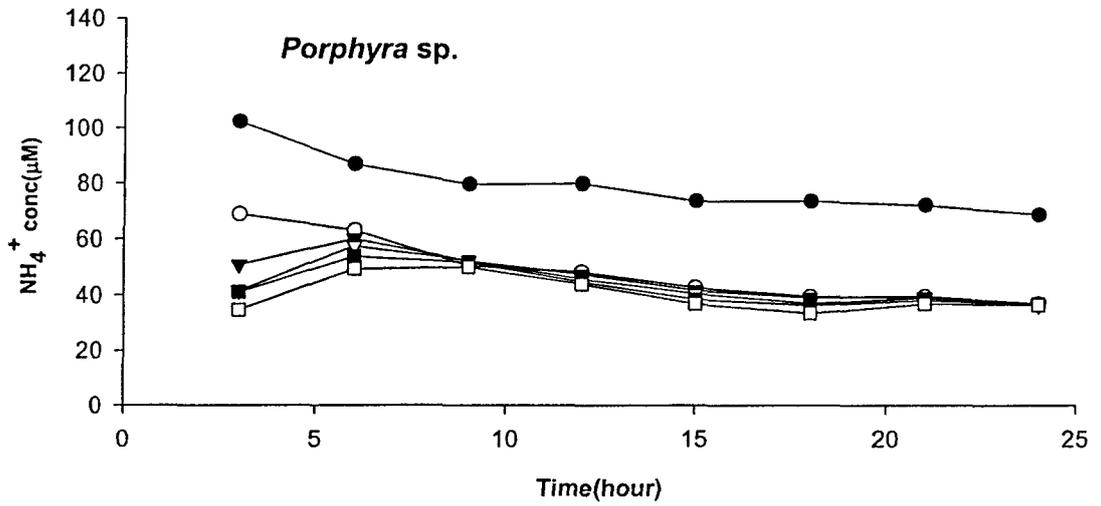
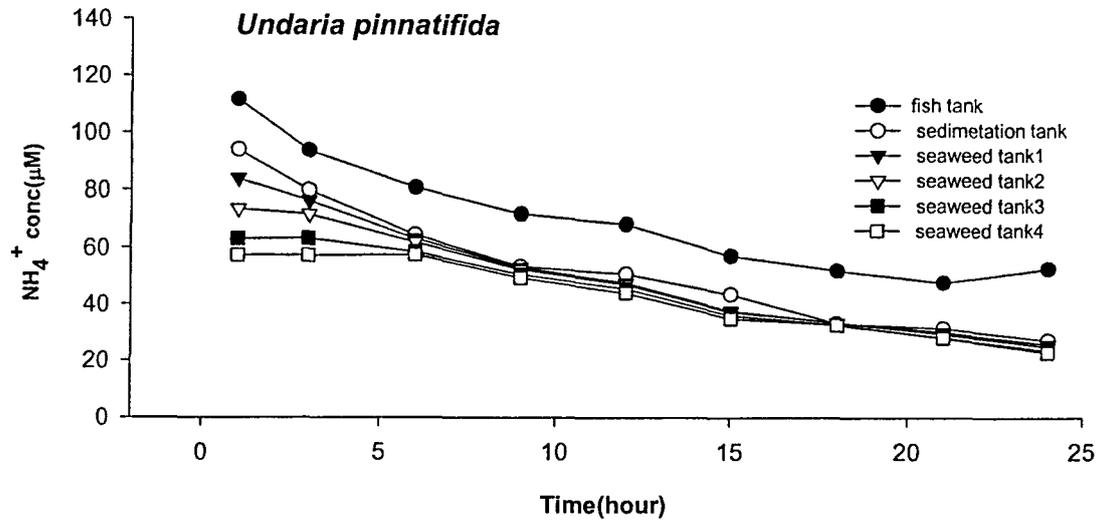


Fig. 3-2-30. The changes of ammonium concentration in the seaweed (*Undaria pinnatifida* and *Porphyra sp.*) integrated system with serial seaweed tank assembly.

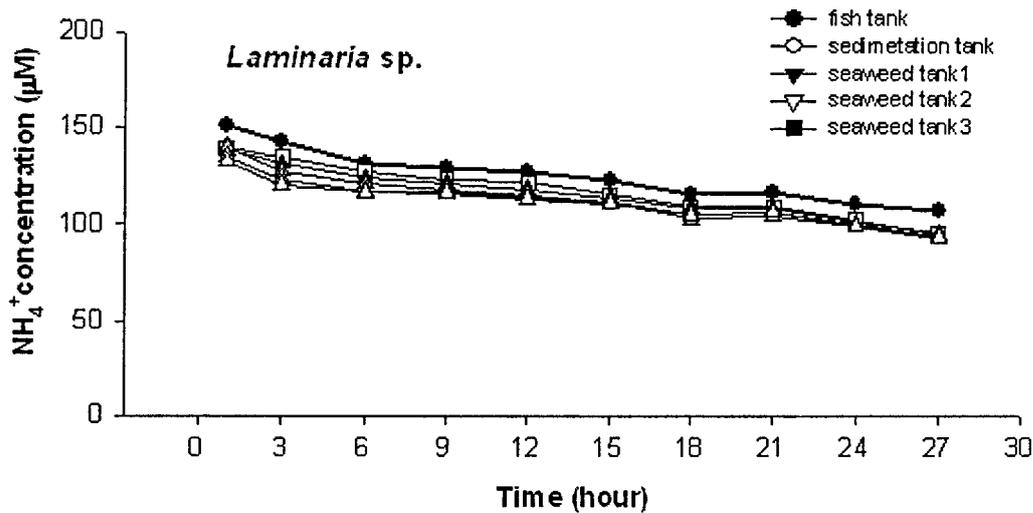


Fig. 3-2-31. The changes of ammonium concentration in the seaweed (*Laminaria* sp.) integrated system with serial seaweed tank assembly.

(2) 모니터링

복합양식 시스템의 유지 및 효율성을 평가하기 위해 10 ~ 20일 동안 지속적으로 순환 시스템을 유지시켰다. 본 연구는 완도 수산 고등학교와 수산과학원 완도 정도리 배양장 내의 수조 시설을 이용하였다. 또한 PAM을 이용하여 해조의 광합성 특성을 측정하여 해조가 건강하게 유지되는지 여부를 알아보았다.

미역(*Undaria pinnatifida*)과 다시마(*Laminaria* sp.)는 약 3.0ton 수조에 약 30kg 넣어 주고, 어류 수조와 연결하여 20일 동안 순환시켰으나, 계절적인 특성으로 인한 수조 시스템의 수온 상승과 염체의 유실로 결과 자료의 경향성을 찾아 볼 수 없었다(Fig. 3-2-32).

여름철 복합양식 대상 해조종으로 적합한 청각(*Codium fragile*)과 어류 수조를 연결하여 순환식 시스템으로 10일 동안 암모니움 농도를 측정하였다. 본 연구는 여름철에 수행된 것으로 실험 시작 1일 경과 후 어류(감성돔)가 집단으로 폐사하는 현상이 나타났다. 이것은 여름철 수온상승으로 인하여 어류가 스트레스를 받아 생육이 저해되었기 때문이었다. 따라서 냉각기를 설치하여 어류(감성돔)와 해조(청각)의 생육에 적합한 수온을 유지시켜 주면서 청각의 복합양식 시스템 효율성을 조사하였다. 어류수조는 실험 시작한 첫날에 20µM에서 10일 후 13µM으로 낮아 졌으며

해조류 수조는 19 μ M에서 12 μ M로 전반적으로 어류수조보다 낮은 농도로 유지되었다. 청각 수조와 감성돔 수조의 복합양식 시스템은 10일 동안 계속적으로 암모니움 농도가 낮아지면서 유지되는 경향을 나타냈다(Fig. 3-2-33).

김(*Porphyra yezoensis*)과 어류 수조를 연결하여 24시간 동안 순환식 시스템을 유지시켰다. 낮은 수온으로 인해 어류의 생리 대사 작용이 활발하기 못하여 어류 수조 배출수의 암모니움 농도가 5 μ M 이하로 낮았다. 높은 암모니움 농도의 배출수에 대한 김의 암모니움 흡수 능력을 알아보기 위해 암모니움 표준 용액을 넣어 70 μ M로 맞추어 준 후 김을 넣어 주었다. 김 수조의 암모니움 농도는 72 ~ 70 μ M로 시작하여 24시간 경과 후 48 ~ 33 μ M로 유지되는 경향이 나타났다(Fig. 3-2-34).

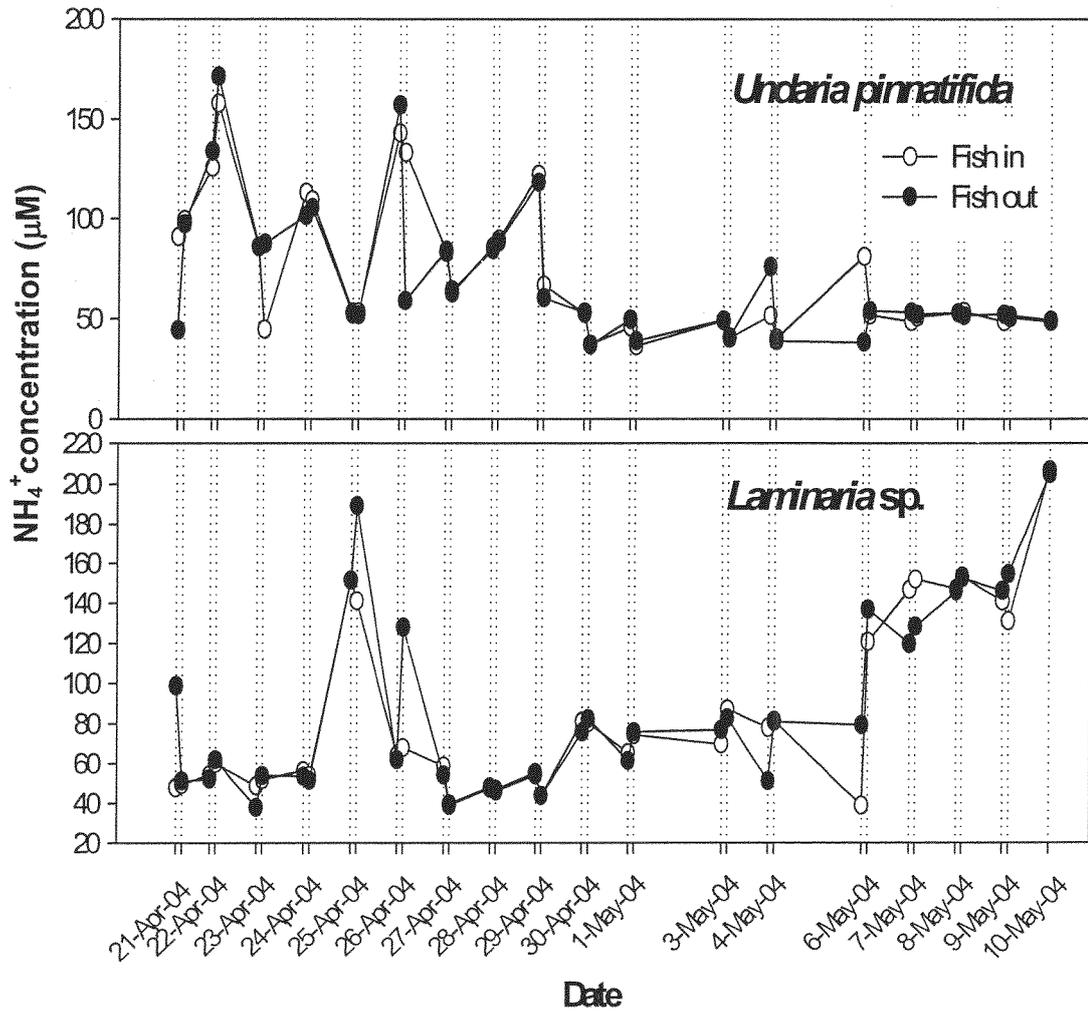


Fig. 3-2-32. The changes of ammonium concentration in the seaweed (*Undaria pinnatifida* and *Laminaria sp.*) integrated system.

Fish & Seaweed tank- Circulation system

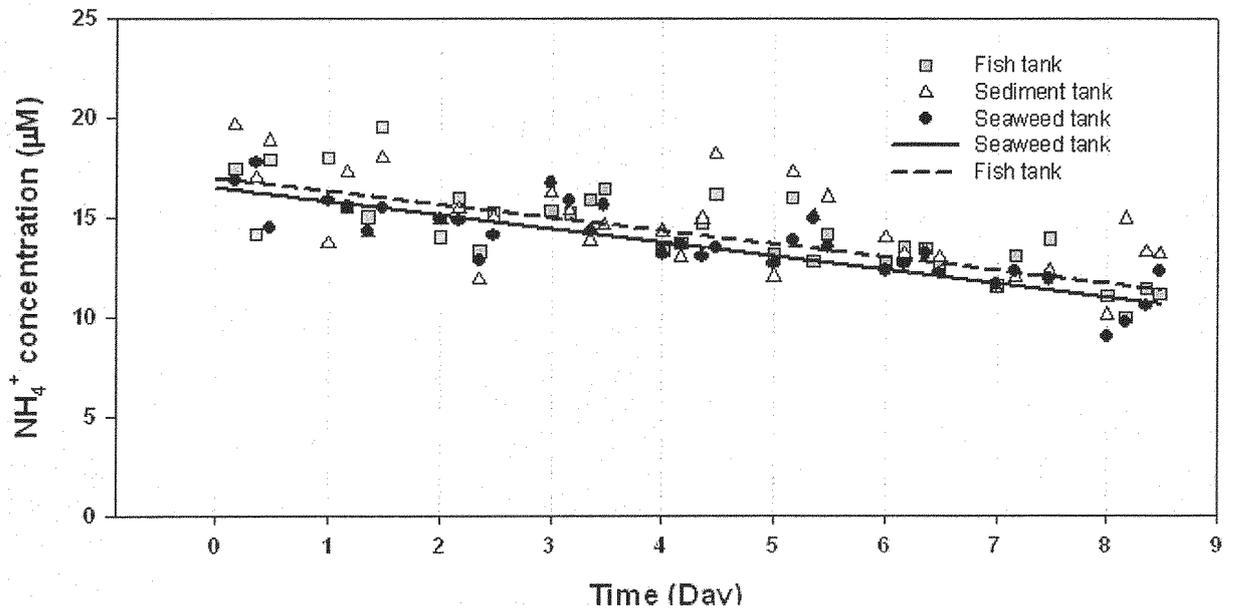


Fig. 3-2-33. The changes of ammonium concentration in the seaweed (*Codium fragile*) integrated system with serial seaweed tank assembly.

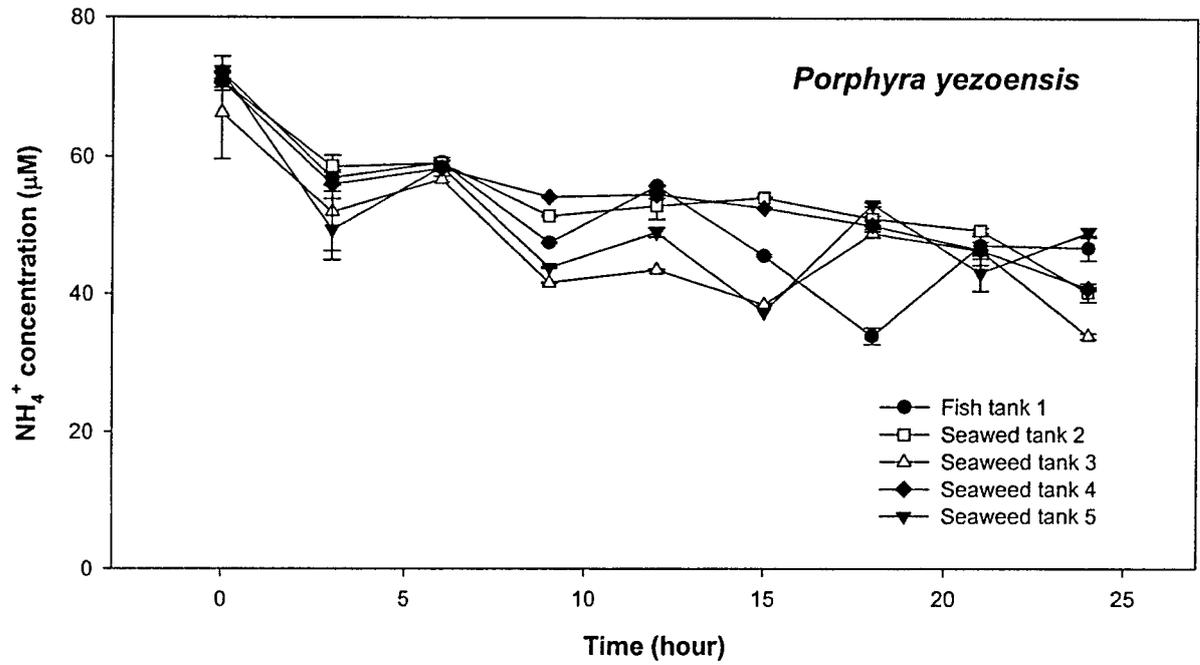


Fig. 3-2-34. The changes of ammonium concentration in the seaweed (*Porphyra yezoensis*) integrated system with serial seaweed tank assembly.

김의 순환식 시스템이 유지되는 24시간 동안 PAM을 이용하여 김의 광합성특성을 알아보았다. 상대적인 전자전달속도와 광량의 관계에서 김의 광합성 특성은 암모니움 흡수가 일어난 후 시간이 지남에 따라 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 전체 김 수조에서 유사하게 나타났다. 김의 최대 상대 전자전달속도 ($rETR_{max}$)는 김 수조 1에서는 $3.7 \mu\text{mol electrons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 39시간 후 $6.7\mu\text{mol electrons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 상승하였고, 수조 2에서는 $4.8\mu\text{mol electrons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 $6.9\mu\text{mol electrons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 수조 3에서 $4.3\mu\text{mol electrons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 $5.2\mu\text{mol electrons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 수조 4에서는 $4.8\mu\text{mol electrons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 $6.9\mu\text{mol electrons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 상승하였다(Fig. 3-2-35). 또한 최대 양자수율 (Maximum quantum yield - MQY)도 시간이 경과함에 따라 상승하는 것으로 나타났다(Fig. 3-2-36). 이는 암모니움 흡수하는 동안 김의 생장이 활발하게 일어나는 결과라고 생각된다.

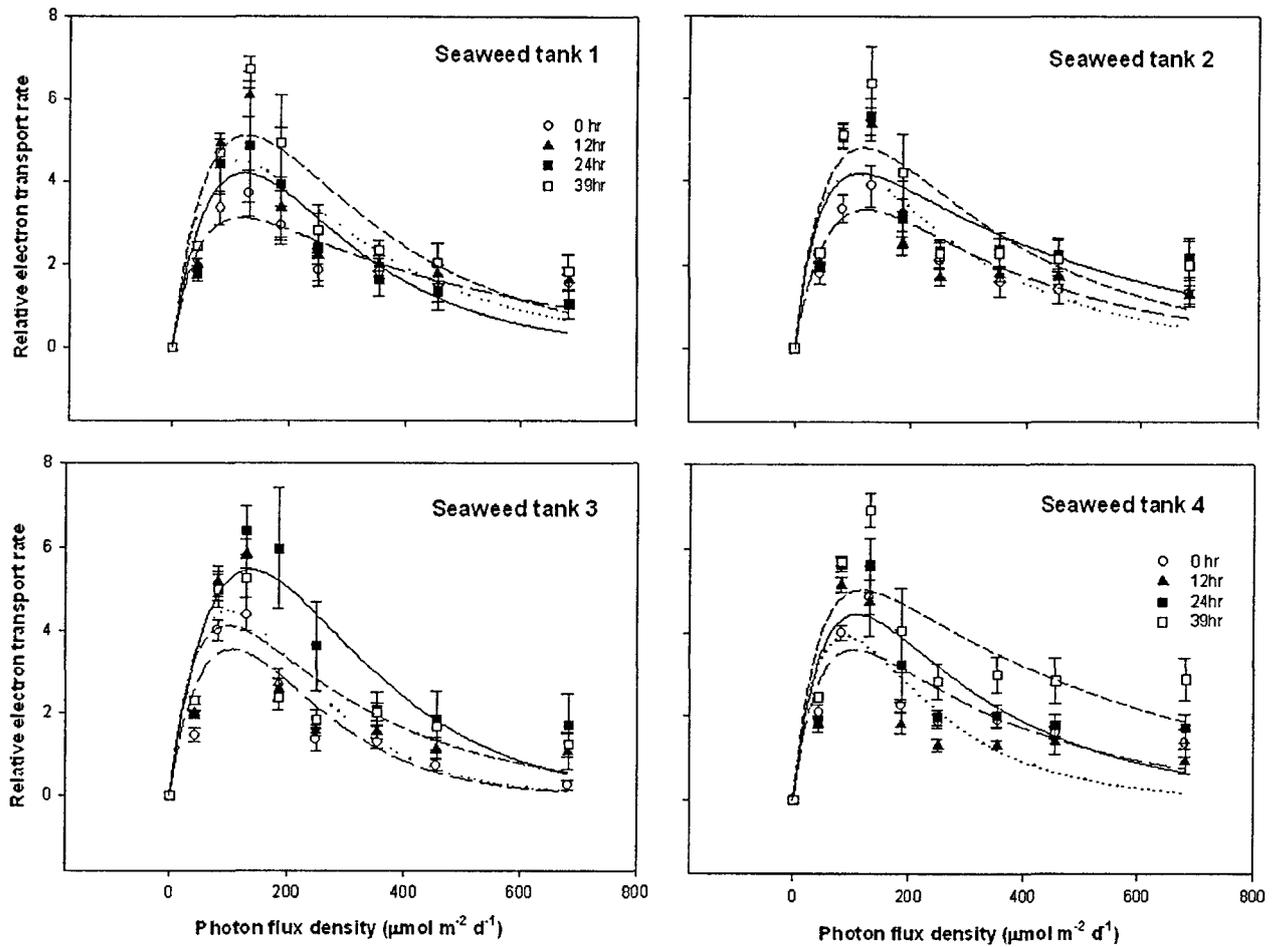


Fig. 3-2-35. Average rapid light curve (RLC) of *Porpyra* sp. in the seaweed integrated system with serial seaweed tank assembly (Unit of relative electron transport rate (rETR) are $\mu\text{mol electrons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and of irradiance are $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

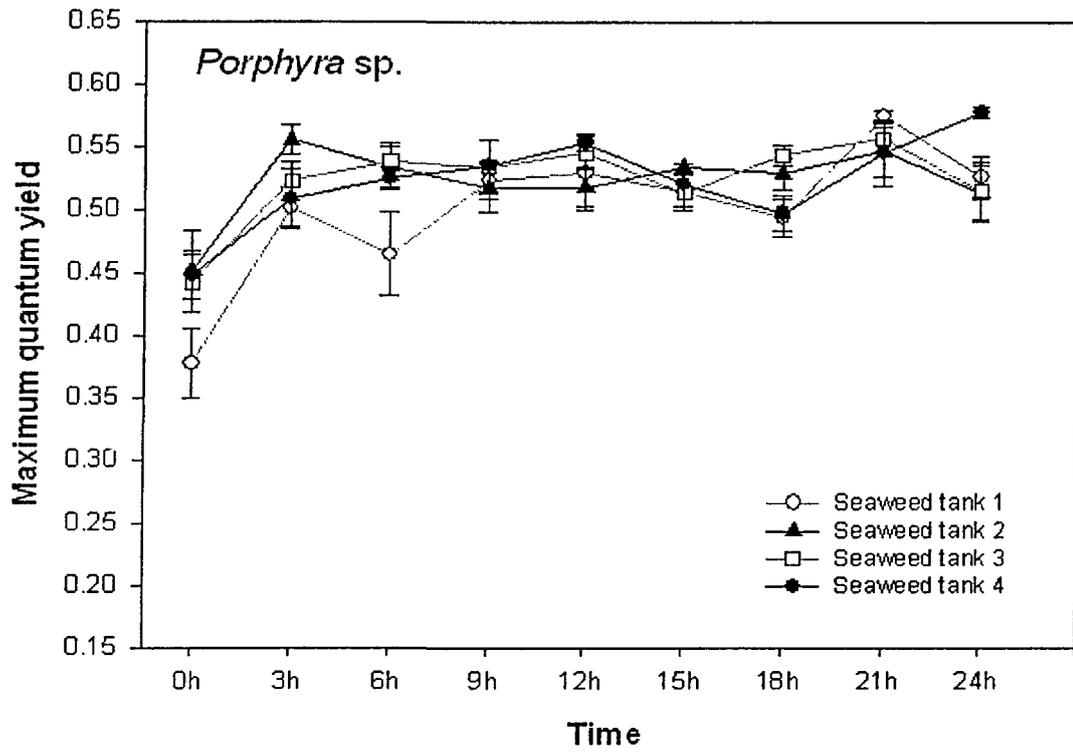


Fig. 3-2-36. Maximum quantum yield ($n=6\pm SE$) for *Porphyra sp.* in the seaweed integrated system with serial seaweed tank assembly.

(나) 중규모 시스템에서의 대상 종의 생태, 생육과 운영 시뮬레이션 모델 개발

어류 수조에서 나온 배출수의 암모니움 농도가 해조류 수조를 거쳐 흡수를 통해 정화된다는 개념으로 해조의 성장과 수확까지 넓혀 STELLA model을 만들었다. 배출수('fish tank effluent')는 해조류 수조('seaweed tank')를 거쳐 흡수를 통해 정화되고, 영양염을 흡수('Uptake')한 해조는 성장을 유지하며, 더 나아가 수확('Harvest')의 단계로 발전할 것이다. 'outflow'는 해조의 영양염 흡수로 인한 배출수의 100%정화가 불가능 하므로 정화하지 못한 암모니움은 그대로 배출될 것이라고 가정하였다(Fig. 3-2-37).

STELLA model 결과 'outflow'로 나가는 배출수의 암모니움 농도는 해조의 흡수로 인한 정화작용으로 낮게 유지되었다. 지속적으로 영양염의 흡수가 일어나면서 해조의 생육을 촉진시켜 성장이 빨라지게 되어 수확 횟수가 증가하는 현상을 나타냈다(Figs 3-2-38, 39). 실제 어류 양식장 배출수의 암모니움 농도와 해조류의 암모니움 흡수율을 조사하고 모델의 가정에 필요한 기초적인 요인들을 수집하여 다음과 같은 STELLA model에 적용하여 해조복합양식을 통한 배출수의 정화 효율을 평가하고 더 나아가 해조 수확량을 추정 할 수 있을 것으로 판단된다(Fig. 3-2-40).

(다) 육상 수조 해조 복합양식 시스템과 해상 가두리 양식장에 해조 복합양식 시스템 적용을 위한 pilot 규모 실험 (※연구 계획 심사에서 제시한 검토사항에 대한 보완 추가 항목)

위의 (가)에서 실시한 대상 해조 종의 중규모 시스템의 생리, 생육 특성 연구에서 육상의 중규모 수조 시스템을 이용하여 pilot 규모 실험을 수행하였다.

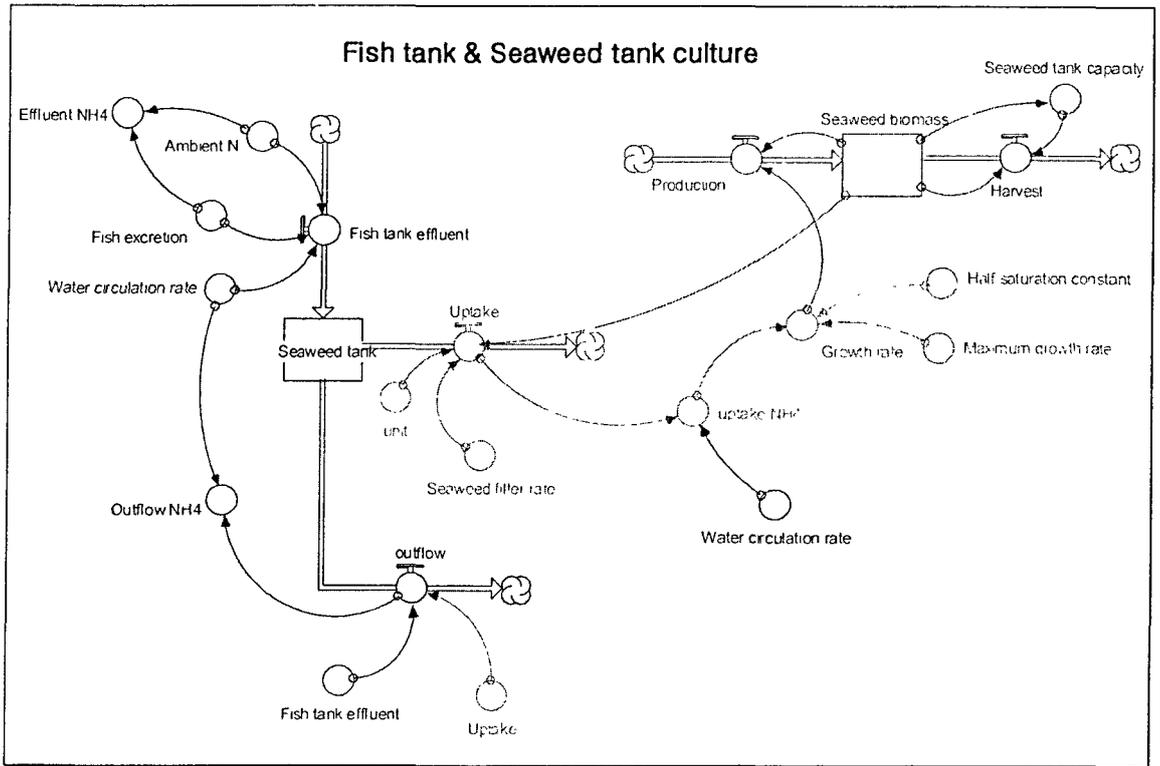


Fig. 3-2-37. Diagram of the STELLA model for the fin-fish and seaweed integrated aquaculture system.

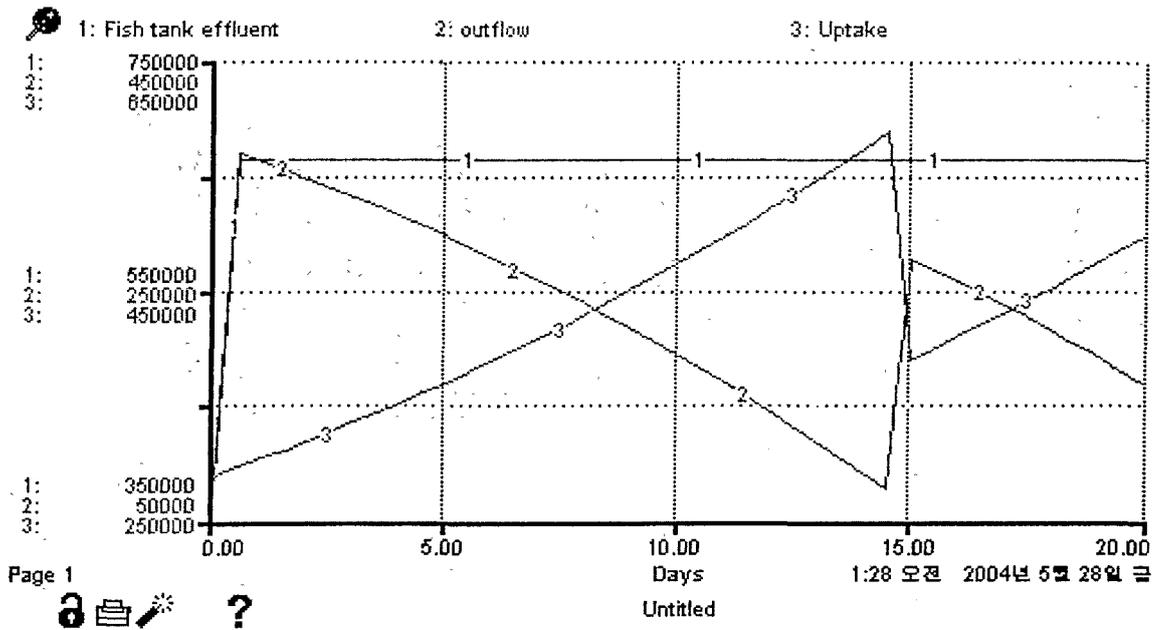


Fig. 3-2-38. The changes of the ammonium concentrations of fish tank effluent,

outflow and uptake by seaweed.

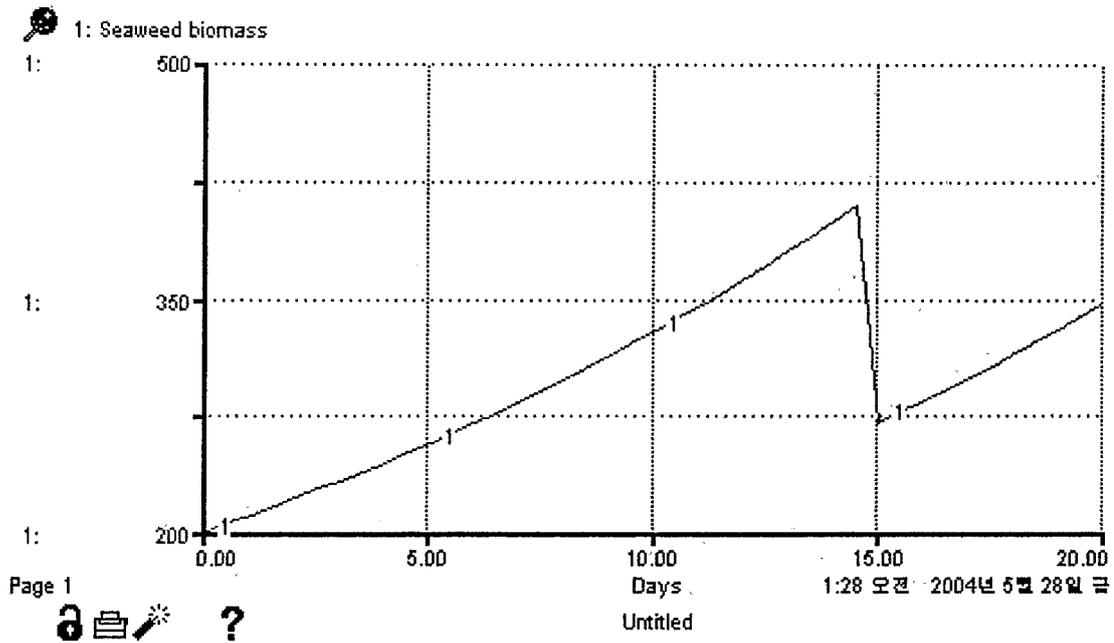


Fig. 3-2-39. The pattern of seaweed biomass changes; increase and harvest.

```

□ Seaweed_biomass(t) = Seaweed_biomass(t - dt) + (Production - Harvest) * dt
INIT Seaweed_biomass = 100
INFLOWS:
  ↻ Production = Seaweed_biomass * Growth_rate
OUTFLOWS:
  ↻ Harvest = IF(Seaweed_biomass >= Seaweed_tank_capacity) THEN(Seaweed_tank_capacity * 0.75) ELSE(0)
□ Seaweed_tank(t) = Seaweed_tank(t - dt) + (Fish_tank_effluent - Uptake - outflow) * dt
INIT Seaweed_tank = 100
INFLOWS:
  ↻ Fish_tank_effluent = (Ambient_N + Fish_excretion) * Water_circulation_rate
OUTFLOWS:
  ↻ Uptake = Seaweed_biomass * unit * Seaweed_filter_rate
  ↻ outflow = Fish_tank_effluent - Uptake
○ Ambient_N = 5 {micromol/liter}
○ Effluent_NH4 = Ambient_N + Fish_excretion
○ Fish_excretion = 50 + PULSE(40, 1, 1)
○ Growth_rate = Maximum_growth_rate * uptake_NH4 / (Half_saturation_constant + uptake_NH4)
○ Half_saturation_constant = 1
○ Maximum_growth_rate = 0.1
○ N_removal = Harvest * tissue_N_%
○ Outflow_NH4 = outflow / Water_circulation_rate
○ Seaweed_filter_rate = 1 {micromol/g/min}
○ Seaweed_tank_capacity = INIT(Seaweed_biomass) * 2
○ tissue_N_% = .04 {% n}
○ unit = 24 * 60
○ uptake_NH4 = Uptake / Water_circulation_rate
○ Water_circulation_rate = 5 {liter/min} * 60 * 24
  
```

Fig. 3-2-40. The equations of the Stella model applied in the seaweed integrated

제 4 장 연구개발 목표 달성도와 대외 기여도

제 1 절 연구개발 목표 달성도

1. 연구 내용의 달성도

목 표	달 성 도(%)	내 용
<ul style="list-style-type: none"> 양식종을 이용한 양식장 배출수의 용존태 질소(주로 암모니움) 흡수 양상 	100	<ul style="list-style-type: none"> 김과 파래(실험실 규모), 미역과 다시마(수조)의 암모니움 흡수양상을 분석하였음. 양식장배출수는 수질 유지를 위한 첨가 약제의 영향을 분석하기 전까지는 암모니아를 첨가한 배양액으로 실험하였음
<ul style="list-style-type: none"> 해조 건중량당 탄소와 질소 분석으로 질소 축적(률) 분석 	100	<ul style="list-style-type: none"> 현장에서 자라는 야생 우점 해조종에 대한 질소 함량을 분석하였음. 질소함량을 바탕으로 대상종을 선별하는 기준을 확립하였음.
<ul style="list-style-type: none"> 해조 광합성, 영양염 흡수율과 성장률 상호관련성 분석 	100	<ul style="list-style-type: none"> 수온, 광도, 영양염의 조건에 따른 영양염(암모니움) 흡수 양상과 배양 전후의 광합성을 활성을 비교하였음. 추후 통계 처리와 경향성, 상호작용 등에 대한 분석이 필요함. 양식장 수질 유지를 위해 첨가 하는 항생제가 해조의 광합성 활성과 암모니움 흡수에 미치는 영향을 조사하였음.
<ul style="list-style-type: none"> 양식장 주변 해역 해양환경의 모니터링과 해조 생육상황 조사 	100	<ul style="list-style-type: none"> 양식장 주변해역과 대조해역에서 수질 조사를 결월 간으로 실시하였음. 해조의 생육은 조건대 해조 군집을 피도를 바탕으로 조사하였음.
<ul style="list-style-type: none"> 우점 해조 종에 대한 영양염 흡수율 파악 	100	<ul style="list-style-type: none"> 야생 해조종에 대한 암모니움 흡수 능력을 조사하였음. 여름철 생육종으로 꼬시래기를 선택하여 흡수양상을 분석하였음.

<ul style="list-style-type: none"> 중규모시스템의 탱크 디자인과 생산/여과 시스템 개발 	100	<ul style="list-style-type: none"> 어류 수조와 침전조, 해조류 수조를 연결하여 생산/여과 시스템을 제작하였음. 복합양식 시스템 대상으로 구명갈파래, 김, 미역, 다시마를 적용하여 암모니움 흡수 능력을 조사하였음.
<ul style="list-style-type: none"> 생산/여과 시스템 모니터링 	100	<ul style="list-style-type: none"> 해조 복합양식 시스템의 지속적인 유지를 파악하기 위해 장기간 여과 시스템을 가동하였음. 대표적인 양식종인 김, 다시마, 미역과 하계종으로 적합한 청각을 대상으로 실시하였음. Diving PAM을 이용하여 해조의 광합성 특성을 측정하여 업체의 상태를 파악하였음.
<ul style="list-style-type: none"> 중규모 양식 시스템의 생태, 생육 시뮬레이션 모델 적용과 개발 	100	<ul style="list-style-type: none"> 본 연구에서 얻어진 data를 바탕으로 STELLA model에 적용하여 배출수의 여과와 해조의 생산을 추정하였음.
<ul style="list-style-type: none"> 해조 복합양식 시스템 적용을 위한 pilot 규모 실험 	100	<ul style="list-style-type: none"> 중규모 육상 탱크 실험을 통하여 pilot규모 실험이 이루어졌음.

2. 평가의 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가

평가의 착안점	자 체 평 가
<ul style="list-style-type: none"> 해조 복합양식 대상종 선별 	<ul style="list-style-type: none"> 양식종과 현장 야생종에 대한 암모니움 흡수능력을 충분히 검토한 결과 김과 파래가 가장 우수하였음. 여름철 해조를 찾는 것이 제일 큰 문제점으로 여름의 고수온기 해결이 풀어야 할 문제점임 - 파래, 꼬시래기, 청각을 대상으로 여름철 복합양식 대상으로 적용 가능성 제시함.

<ul style="list-style-type: none"> ◦ 중규모 복합양식 시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 실험실 규모의 실험이 불가능한 미역과 다시마를 대상으로 0.5-3톤 규모의 수조에서 영양염 흡수실험을 수행하였고, 순환여과조에 대한 자료를 확보하기 위해 수행하였음. ◦ 중규모 육상 수조 순환 시스템을 장기간 가동하여 지속적인 유지 가능성을 파악하였음.
<ul style="list-style-type: none"> ◦ 국제협력 체제 구축 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 제 12차 북태평양과학기구 총회 (PICES XII, 2003. 10. 9-18, Seoul, Korea)의 Session 4 (Aquaculture in the ocean ecosystem)를 주관하였음 (Co-Convener: 정익교). ◦ 상기 회의에서 참석자들의 제안으로 'working group'을 상정하여 2004년에 총회에서 분임그룹으로 채택되었음: - Working Group 18: Mariculture in the 21st century - The intersection between ecology, socio-economics and production : 제 13차 북태평양과학기구 총회 (PICES XIII, 2004. 10. 9-18, Hawaii, USA 개최 예정 (Co-Chairman: 정익교) ◦ 한미양식회담에서 지속적으로 해조를 이용한 복합양식에 대한 연구를 양국에서 공동으로 수행하기로 하였음 (2004. 3. 1. 하와이): 해조 복합양식분야 참석자 (수산과학원 백재민, 부산대학교 정익교) 미국측: (Univ. Connecticut Dr. C. Yarish)
<ul style="list-style-type: none"> ◦ 시뮬레이션 모델 적용과 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ STELLA model을 적용하여 해조 복합양식 시스템의 효율성 추정

제 2 절 대외 기여도

양식장 시설의 적절한 배치와 생태계 기반 관리에 필요한 핵심 요인과 변량에 대한 기본 자료로 활용되어 연안역 생태계 기능과 수질의 유지하는 통합관리에 적용되어야 한다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

제 1 절 연구개발 성과 활용 실적

과제명	지속가능한 친 환경 해조 복합양식 시스템 개발					
주관기관	부산대학교		연구책임자	이춘환		
산업재산권(특허, 실용신안, 의장, 저작권, 규격, 프로그램등록 등) 발생현황						
구분	명칭	출원인	국명	출원번호 (등록번호)	출원일 (등록일)	비고
특허	조류를 이용한 견직물의 염색방법	정익교 최문선 이진애 이춘환	한국	2005-34710	2005.4.26	
국내외 전문학술지 게재						
학술지 명칭		연도, 호		발행기관(국명)		
Algae		2005: 20(2) (in press)		한국 조류학회 (한국)		
Indian Journal of Marine Science		2005 (in press)		National Institute of Science Communication and Informantion Resources (인도)		
한국조류학회지 소식지		2003		한국 조류학회 (한국)		
학술회의 발표						
학술회의 명칭		연도, 호		장소, 국명		
한국수산학회		2003/05/16		부산, 한국		
한국조류학회		2003/05/29		광주, 한국		
North Pacific Marine Science Organization Annual Meeting (PICES 12)		2003/10/14		서울, 한국		

The 5th Asia-Pacific Conference on Algal Biotechnology, The Asia-Pacific Society of Applied Phycology	2003/10/17	칭다오, 중국
Aquaculture 2004, World Aquaculture Society	2004/03/01	호놀룰루, 미국
Aquatic Life and Water Environment, Institute of Hydrbiology	2004/12/17	광주, 중국
한국 양식학회	2005/5/20	부산, 한국
기타 성과활용 실적		
[초청강연] “Mariculture in Korea” Hydrobiology in Korea, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Science (2004/12/15)(중국)(Wuhan)		
[수산양식] “환경친화적 복합양식시스템 개발” 2004년 1월호		
[현대해양] “친환경 해조 복합양식에 대한 외국의 연구 사례” 2004년 7월호		
[국립수산과학원 양식환경연구소 세미나] “환경친화적 양식어장 관리” 2004/5/27		

제 6 장 참고문헌

- 정익교. 2003. 환경 친화적인 해조 복합양식 시스템. 한국조류학회지 소식지 14권 1호.
- 정익교. 2004. 친환경 해조 복합 양식에 대한 외국의 연구 사례. 현대해양. 7월호.
- 해양환경공정시험. 1998. 해양수산부.
- 수산청 1994. 복합양식 개발에 관한 연구, 최종보고서, 수산진흥원. 570p.
- Anderson R.J., Smit A.J. and Levitt G.J. 1999. Upwelling and fish-factory waste as nitrogen sources for suspended cultivation of *Gracilaria gracilis* in Saldanha Bay, South Africa. *Hydrobiologia* 398/399: 455-462.
- Anonymous 2000. The state of world fisheries and aquaculture 2000. FAO 2000. Electronic edition <Http://www.fao.org/docrep/003/x8002e/x8002e00.htm>.
- Bardach J.E. (ed.) 1997. Sustainable aquaculture. Wiley & Sons, Inc. New York. 250p.
- Bodvin T., Indergaard M., Norgaard E., Jensen A. and Skaar A. 1996. Clean technology in aquaculture - a production without waste products? *Hydrobiologia* 326/327: 83-86
- Brzeski V. and Newkirk G. 1997. Intergrated coastal food production systems - a review of current literature. *Ocean & Coastal Management* 34: 55-71.
- Buschmann A.H. 1996. An introduction to integrated farming and the use of seaweeds as biofilters. *Hydrobiologia* 326/327: 59-60.
- Buschmann A.H., Troell M., Kautsky N. and Kautsky L. 1996. Integrated tank cultivation of salmonids and *Gracilaria chilensis* (Gracilariiales, Rhodophyta). *Hydrobiologia* 326/327: 75-82.
- Chopin T. and Welis P.G. (eds) 2000. Opportunities and challenges for protecting, restoring and enhancing coastal habitats in the Bay of Fundy. Proceedings of the 4th Bay of Fundy Science Workshop. 237pp.
- Chopin T., Buschmann, A.H., Halling C., Troell M., Kautsky N., Neori A., Kraemer G.P., Zertuche-González J.A., Yarish C. and Neefus C. 2001. Intergrating seaweeds into marine aquaculture system: A key toward sustainability. *J. Phycol.* 37: 975-986.

- Chopin T., Yarish C., Wilkes R., Belyea E., Lu S. and Mathieson A. 1999. Developing *Porphyra*/salmon integrated aquaculture for bioremediation and diversification of the aquaculture industry. *J. appl. Phycol.* 11: 463-472.
- Cohen I. and Neori A. 1991. *Ulva lactuca* biofilters for marine fishpond effluents I. Ammonia uptake kinetics and nitrogen contents. *Bot. Mar.* 34: 475-482.
- Davis T.A., Volesky B. and Vieira R.H.S.F. 2000. *Sargassum* seaweed as biosorbent for heavy metals. *Water Res.* 34: 4270-4278.
- Ellener S. Neori A., Krom M.D., Tsai K. and Easterling, M.R. 1996. Simulation model of recirculating mariculture with seaweed biofilter: development and experimental tests of the model. *Aquaculture* 143: 167-184.
- Jones A.B., Preston N.P. and Dennison W.C. 2002. The efficiency and condition of oysters and macroalgae used as biological filterers of shrimp pond effluent. *Aquaculture Res.* 33: 1-19
- McVey J. P., Stickney R. R., Yarish C. and Chopin T. 2002. Aquatic polyculture and balanced ecosystem management: New paradigms for seafood production. In: Stickney R. R. and McVey J. P. (eds), *Responsible marine aquaculture*. CABI Publishing, New York pp. 91-104.
- Naylor R.L., Goldburg R.J., Primavera J.H., Kautsky N., Beveridge M.C.M., Clay J., Folke C., Lubchenco J. Mooney H., and Troell M. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405: 1017-1024.
- Nelson S.G., Glenn E.P., Conn J., Moore D., Walsh T and Akutagawa M. 2001. Cultivation of *Gracilaria parvispora* (Rhodophyta) in shrimp-farm effluent ditches and floating cages in Hawaii: a two-phase polyculture system. *Aquaculture* 193: 239-248.
- Neori A. and Cohen I. 1991. *Ulva lactuca* biofilters for marine fishpond effluents: II. Growth rate, yield and C:N ratio. *Bot. Mar.* 34: 483-489.
- Neori A., Ragg N.L.C. and Shpigel M. 1998. The integrated culture of seaweed, abalone, fish and clams in modular intensive land-based systems: II. Performance and nitrogen partitioning within an abalone (*Hotliotis tuberculata*) and macroalgae culture system. *Aquacultural Engineering*, 17: 215-239.
- Neori A., Shpigel M. and Ben-Ezra D. 2000. A sustainable integrated system for

- culture of fish, seaweed and abalone. *Aquaculture* 186: 279-291.
- Neori A., Chopin T., Troell M., Buschmann A.H., Kraemer G.P., Halling C., Shpigel M. and Yarish C. 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture* 231: 361-391.
- Parsons T. R., Maita Y. and Lalli C. M. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon, Oxford
- Pedersen M. F. 1994. Transient ammonium uptake in the macroalga *Ulva lactuca* (Chlorophyta): nature, regulation, and the consequences of choice of measuring technique. *J. Phycol.* 30: 980-986.
- Platt T., Gallegos C. and Harrison W.G. 1980. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblage of marine phytoplankton. *J. Mar. Res.* 38: 687-701.
- Ralph P.J., Gademann R. and Dennison W.C. 1998. In situ seagrass photosynthesis measured using a submersible, pulse-amplitude modulated fluorometer. *Mar. Biol.* 132: 367-373
- Ryther J.H. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. *Science* 166:72-76.
- Shpigel M. and Neori A. 1996. The integrated culture of seaweed, abalone, fish and clams in modular intensive land-based systems: I. Proportions of size and projected revenues. *Aquacultural Engineering*, 15: 313-326.
- Schreiber U., Gademann R., Ralph P.J. and Larkum A.W.D. 1997. Assessment of photosynthetic performance of prechloron in *Lissoclinum patella* in hospite by chlorophyll fluorescence measurements. *Plant Cell Physiol.* Tokyo 38: 945-951.
- Subandar A., Petell R. J. and Harrison P. J. 1993. *Laminaria* culture for reduction of dissolved inorganic nitrogen in salmon farm effluent. *J. Appl. Phycol.* 5: 455-463.
- Wu R.S.S. 1995. The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future. *Mar. Pollut. Bull.* 31: 159-166.