

이학박사 학위논문

위성탐사 및 현장관측에 의한
동중국해 chlorophyll *a* 변동 특성

지도교수 조 규 대

이 논문은 조 규 대 교수의 지도 하에 학위논문으로 제출함



2005년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

해양산업공학 협동과정

장 이 현

장이현의 이학박사 학위논문을 인준함.

2004년 12월 22일

주 심 이 학 박 사 윤 중 휘



부 심 농 학 박 사 조 규 대



위 원 공 학 박 사 김 동 선



위 원 이 학 박 사 최 용 규



위 원 수 산 학 박 사 김 상 우



목 차

<i>Figure lists</i>	iii
<i>Table lists</i>	viii
<i>Abstract</i>	ix
1. 서 론	1
2. 자료 및 방법	7
2.1. 현장관측과 그 해석	7
2.2. 흡광조사	9
2.3. 위성탐사	10
3. 결 과	13
3.1. 동중국해 해황특성	13
3.1.1. 수온, 염분 및 수괴분석	28
3.1.2. 영양염 분포	27
3.1.3. 부유물질 분포	43
3.1.4. 용존산소 분포	49
3.2. chlorophyll <i>a</i> 의 분포 특성	54

3.3. 식물플랑크톤 색소의 해수광 특성	62
3.4. 위성탐사 chlorophyll <i>a</i> 분포	66
4. 고 찰	72
4.1. chlorophyll <i>a</i> 와 해양인자간의 관계	72
4.1.1. chlorophyll <i>a</i> 와 수온, 염분	72
4.1.2. chlorophyll <i>a</i> 와 영양염	76
4.1.3. chlorophyll <i>a</i> 와 부유물질 및 용존산소	80
4.2. 식물플랑크톤 색소의 광특성	83
4.3. 위성 chlorophyll <i>a</i> 분포와 추정	85
5. 결 론	87
감사의 글	89
참고문헌	91
Appendix	98

Figure lists

Fig. 1.1. Schematic representation of the current system and bathymetry in the East China Sea (Inoue, 1975).

Fig. 2.1. Map shows the survey area and measuring stations.
E : East area (st. 12); C : Center area(st. 17); W : West area(st. 22)

Fig. 3.1.1. Horizontal distributions of mean surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995-2003).

Fig. 3.1.2. Vertical distributions of mean temperature ($^{\circ}\text{C}$) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995~2003).

Fig. 3.1.3. Horizontal distributions of mean surface salinity (psu) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995~2003).

Fig. 3.1.4. Vertical distributions of mean salinity (psu) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995~2003).

Fig. 3.1.5. Temperature-salinity-time (T-S-t) diagrams for the East China Sea waters.

Fig. 3.1.6. Horizontal distributions of mean surface DIN (μM) in

February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995 ~ 2003).

Fig. 3.1.7. Vertical distributions of mean DIN (μM) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995 ~ 2003).

Fig. 3.1.8. Horizontal distributions of mean surface silicate (μM) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995 ~ 2003).

Fig. 3.1.9. Vertical distributions of mean surface silicate (μM) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995 ~ 2003).

Fig. 3.1.10. Horizontal distributions of mean surface phosphate (μM) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995 ~ 2003).

Fig. 3.1.11. Vertical distributions of mean surface phosphate (μM) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995 ~ 2003).

Fig. 3.1.12. Horizontal distributions of mean surface suspended solid (mg/L) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 4 years (2000 ~ 2003).

Fig. 3.1.13. Vertical distributions of mean suspended solid (mg/L) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 4 years (2000 ~ 2003).

Fig. 3.1.14. Horizontal distributions of mean surface dissolved oxygen ($\text{m}\ell/\text{L}$) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 4 years (2000 ~ 2003).

Fig. 3.1.15. Vertical distributions of mean surface dissolved oxygen ($\text{m}\ell/\text{L}$) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 4 years (2000 ~ 2003).

Fig. 3.2.1. Horizontal distributions of mean surface chlorophyll *a* (mg/m^3) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 4 years (2000 ~ 2003).

Fig. 3.2.2. Vertical distributions of mean chlorophyll *a* (mg/m^3) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 4 years (2000 ~ 2003).

Fig. 3.2.3. Seasonal profiles of chlorophyll *a* (mg/m^3) at west area, center area and east area during 4 years (2000 ~ 2003).

Fig. 3.3.1. Spectrum of absorption coefficient of living phytoplankton (a_{ph}) in the East China Sea in May, 2000.

Fig. 3.3.2. Relationship between the absorption coefficient, $a_{\text{ph}}(440)$ and chlorophyll *a* during 3 years (2000 ~ 2002).

Fig. 3.3.3. Relationship between the absorption coefficient, $a_{\text{ph}}(440)$ and chlorophyll *a* in (a) February, (b) May, (c) August and (d) November during 3 years (2000 ~ 2002).

Fig. 3.3.4. Relation between the specific absorption coefficient, $a_{ph}^*(440)$ and chlorophyll a in (a) Case I & II water, (b) Case II water and (c) Case I water.

Fig. 3.4.1. Orbview 2/SeaWiFS monthly mean chlorophyll a concentration images from January to June 2002 (Data supported by the Goddard Space Flight Center Earth Science Distributed Active Archive Center (GES.DAAC)).

Fig. 3.4.2. Relationship between the *in situ* chlorophyll a and the estimated chlorophyll a from the processed SeaWiFS imagery using the OC 2 algorithm in the East China Sea.

Fig. 3.4.3. Distributions of the chlorophyll a from SeaWiFS on 6th Nov., 2002. (a) chlorophyll a from SeaWiFS level 2 data using OC 2. (b) chlorophyll a from SeaWiFS data using an empirical formula. (c) *in situ* chlorophyll a in Nov., 2002.

Fig. 4.1.1. Chlorophyll a -temperature-time (Chl- a -T-t) diagrams for East China Sea waters.

Fig. 4.1.2. Chlorophyll a -salinity-time (Chl-S-t) diagrams for East China Sea waters.

Fig. 4.1.3. Relationship between surface chlorophyll a (mg/m^3) and salinity (psu) in 2000 (a), 2001 (b), 2002 (c) and 2003 (d) in the East China Sea.

Fig. 4.1.4. Chlorophyll a -DIN-time (Chl-N-t) diagrams for East China Sea waters.

Fig. 4.1.5. Chlorophyll *a*-Phosphate-time (Chl-P-t) diagrams for East China Sea waters.

Fig. 4.1.6. Chlorophyll *a*-Silicate-time (Chl-Si-t) diagrams for East China Sea waters.

Fig. 4.1.7. Chlorophyll *a*-Suspended Solid-time (Chl-SS-t) diagrams for East China Sea waters.

Fig. 4.1.8. Chlorophyll *a*-Dissolved Oxygen-time (Chl-DO-t) diagrams for East China Sea waters.

Fig. 4.1.9. Areas of the Case I and Case II water in this study.

Table lists

Table 2.1. Normal radiometric parameters for SeaWiFS

Table 4.1. Correlation coefficients between surface chlorophyll *a*
and each ocean factors

Study on the variations of chlorophyll a in the East China Sea using *in situ* survey and satellite remote sensing

Lee-Hyun Jang

*Interdisciplinary Program of Ocean Industrial Engineering,
Graduate school, Pukyong National University*

Abstract

This study analyzed the variation characteristics of chlorophyll a which plays a role as the index of primary production in the East China Sea(ECS). For this study, the relationships between the variation of chlorophyll a and ocean environmental factors, the optical properties were analyzed. To quantify the variation of chlorophyll a distribution and the concentration of chlorophyll a , we used the field observation data from National Fisheries Research and Development Institute(NFRDI) and the estimated chlorophyll a using SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) satellite.

The relationship between the variation of chlorophyll a concentration and ocean environmental factor through the analysis of chlorophyll a -ocean environmental factor-time diagram was analyzed. The characteristics of ocean optical property were analyzed through the method of light extinction.

Chlorophyll *a* concentration in the East Sea showed two peaks seasonally, that is, spring (May), summer (August). Its concentration around coastal waters in the western part of 125°E was three times as high as off shore in the eastern part of 126.5°E. The variation of chlorophyll *a* concentration in the Tsushima Warm Current (TWC) region was stable and in the coastal waters adjacent to the China was unstable.

The spatial variation of low salinity water was matched well with that of nutrients and from this result, the relationships between the variation of salinity and chlorophyll *a* concentration can be explained well. In spring and summer in the coastal waters of the East China Sea, seawater temperature plays an important role in the variation of chlorophyll *a*, the reverse salinity had high negative correlation. The variation of salinity in the coastal waters of the ECS was closely connected with the variation of chlorophyll *a* concentration in summer.

The East China Sea can be divided into two areas based on the characteristics of optical properties and other oceanic conditions. The first, the TWC region is applicable to Case I, and the second the coastal waters in the East China Sea is applicable to Case II. The Case I region is deeper than around waters, the variations of suspended solid concentration were lower seasonally and temperature was more important factor than salinity in oceanic condition. The

Case II region shallower, the concentration of suspended solid high and its seasonally variation great, and salinity was more important factor than temperature in oceanic condition.

Temporal and spatial variations of chlorophyll *a* estimated by SeaWiFS satellite were great. The blooming of phytoplankton was highest in summer season (August) and its duration period was long from April to September, and it is extended gradually from coastal waters around the Yangtze river to the neighboring seas of Jeju island.

The estimated concentration of chlorophyll *a* using the algorithm derived from the relationship between field observations and satellite observations had highly correlation with those of the field. The algorithm equation is $chl-a = 0.1681exp^{0.6218 OC2\ chl-a}$, and it seems that this algorithm gives important information for estimating the distribution of chlorophyll *a* concentration in the East China Sea.

Hereafter, to get more precision result, development of algorithm will be needed through studies related to relationships between field observation and satellite observation, the optical properties of seawater and oceanic conditions.

1. 서 론

동중국해(東中國海)는 북서태평양의 연해(沿海)로서 세계적으로 잘 알려진 넓은 대륙붕 해역으로서 그 면적은 75만 2천 km^2 이며, 평균 수심은 349 m이다. 해저지형을 보면, 수심 200 m 이천의 대륙붕은 대만(臺灣)에서 류구열도(琉球列島) 북서방 해역을 거쳐 일본 구주(九州)로 이어지며, 그 남쪽은 대만해협을 거쳐 남중국해의 대륙붕으로 이어진다. 수심 50~150 m의 대륙붕역은 양자강 하구의 동쪽편이 불쭙 튀어나온 모양으로 중국 연안에 위치하고 있다 (Fig. 1.1). 대륙붕단 (continental shelf break)은 수심 약 200 m 부근에 형성되어 있다.

동중국해는 지리적으로 보면 제주도와 대만(臺灣) 북서 연안까지의 매우 넓은 해역에 걸쳐 있어 북쪽은 황해(黃海)와 이어져 발해만에까지 이르고 있고 대한해협(大韓海峽)에 의해 동해(東海)와 접하고 있다. 그 경계를 보면 북쪽의 제주도에서 동쪽의 오도열도(五島列島)와 구주(九州)까지, 남쪽으로는 구주남단에서 류구열도(琉球列島)를 거쳐 대만에 둘러 싸여있다. 또한 동중국해는 담수의 영향을 크게 받는 해역이다. 중국대륙에서 기원한 양자강의 연간 유출량은 9×10^{11} ton/yr, 480×10^6 ton/yr 이나 되는 부유물질 유출량의 영향으로 계절에 따라 중국쪽 연안역의 수괴특성이 매우 다양하게 변화한다 (Yanagi, 1996; Chen and Yu, 2001).

대륙붕의 주요 수계(Fig. 1.1)는 중국대륙 연안을 따라 흐르는 저온, 저염, 고영양염의 양자강수 (Changjiang diluted water), 대륙붕단을 따라 흐르는 고온, 고염, 빈영양의 쿠로시오 난류수 (Kuroshio Warm

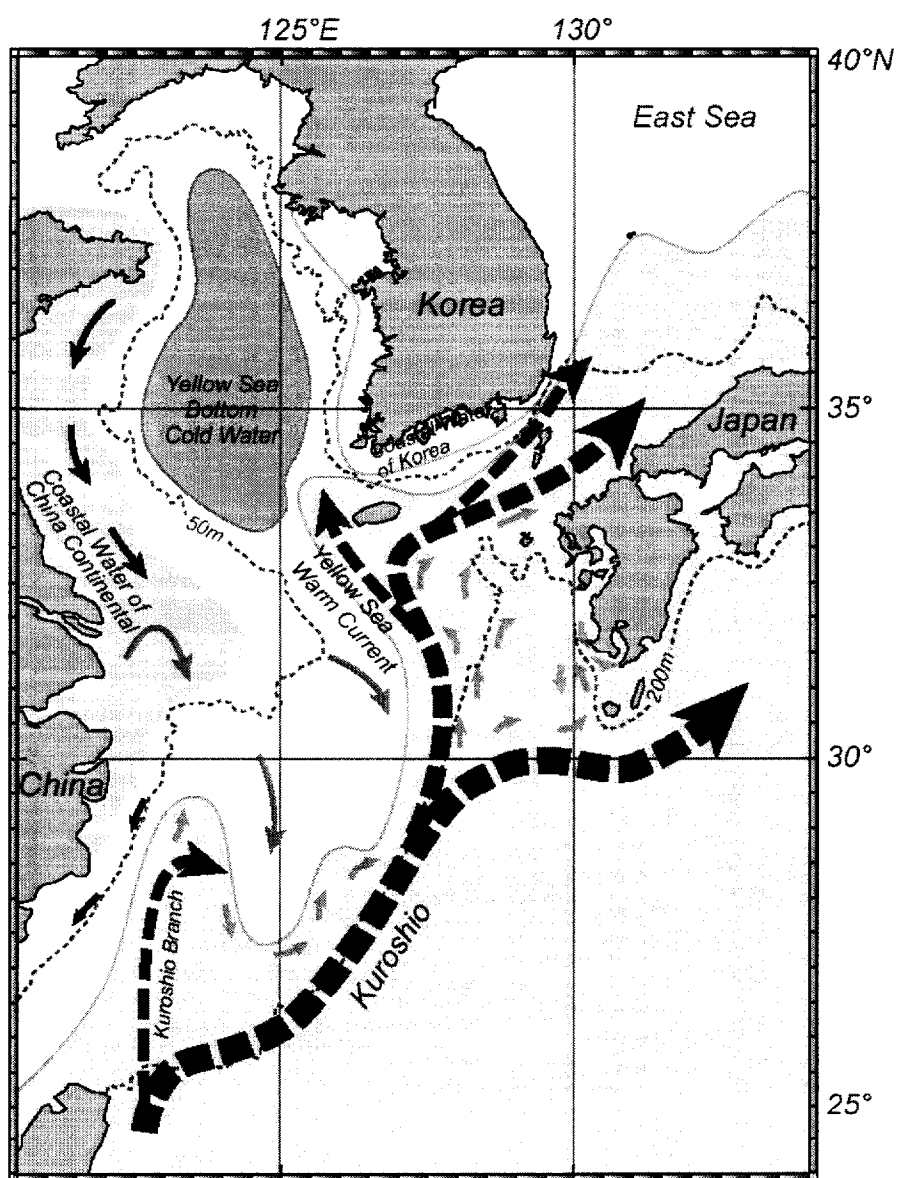


Fig. 1.1. Schematic representation of the current system and bathymetry in the East China Sea (Inoue, 1975).

Water) 그리고 대만해협에서 유입되는 고온, 고염, 빈영양의 대만해협 난류수인 쿠로시오 분파수(Kuroshio Branch Water)가 있으며, 쿠로시오 난류수는 제주도 남쪽에서 다시 황해난류와 대만난류로 분리되어 각각 황해와 대한해협을 통해 동해로 유입된다 (井上, 1975; Wong *et al.*, 1998). 따라서 동중국해는 황해와 한국 동해로 이어지고 있으므로 중국대륙 및 한국 남안의 연안수와 쿠로시오(黑潮)의 영향을 받는 외해역 난류수 등이 만나 복잡한 해황 변동을 일으켜 해양학적으로도 그 가치가 매우 중요한 해역이다 (Chikuni, 1985; Zhang and Weng, 1996).

최근 중국의 급속한 산업화로 연안역의 오염이 가속화되고 있다. 또한 해마다 범람하는 양자강 홍수피해를 막고 전기 발전과 농·공업용수 공급 등 다목적용으로 1993년부터 현대판 만리장성이라 일컫는 산샤댐(Three Georges Dam) 건설이 2009년 완공을 목표로 진행되고 있다. 이로 인하여 중국대륙 및 양자강과 인접한 동중국해에서는 필연적으로 환경 변화가 초래될 것으로 예상된다.

이러한 동중국해에 대한 연구로서 주로 순환과 수계의 분포에 관련된 것이 많다. 이들 중에 수치모델 연구로는 바람과 조석에 의한 해수 순환 및 부유물의 이동에 관한 것 (Jeon and An, 1997; Choi and Suh, 1992; Lee *et al.*, 2000)을 연구하였다. 수온, 염분 분포 등을 해양관측 및 그 해석과 관련된 해양전선과 수괴에 관한 계절적인 것을 연구한 것이거나 (Son *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 1998; Shin *et al.*, 2001) 또는 이들 해역에 존재하는 해류기원과 분기현상에 관한 연구 (Pang and Oh, 1995) 등이 주를 이루고 있다.

생물해양학적 연구는 플랑크톤의 종조성과 군집 구조에 관한 연구가 주로 이루어졌다. 수괴와 동물플랑크톤의 분포에 관한 연구(Seo, 1999)가 대부분이고 (Yoon *et al.*, 2003), 식물플랑크톤의 생태특성과 군집구조에 관한 연구 (Oh, 1999; Roh, 2000) 이었다.

한편 동중국해는 고등어, 꽁치 및 오징어와 같이 동해로 북상하는 어류들의 월동장으로 알려져 있다 (Nishimura, 1965). 다양한 어종들의 산란장, 월동장으로서 그 역할과 중요성이 매우 큰 해역이며, 동중국해 어업자원에 관한 많은 연구가 해황, 전선 및 수괴의 분포와 관련된 것 이었다 (Cho, 1986; Hwang, 1992).

또한 양자강 유출수 변화와 관련한 대응 연구로 Yang *et al* (2002)은 최근 양자강의 부유물질 공급이 급격히 감소하고 있다고 보고하였다. Yang *et al* (2003)은 부유물질의 감소로 인해 하구역 삼각주가 침식된다는 결과를 나타내었다.

해양에서 식물플랑크톤은 먹이사슬의 기초 단계에 위치한다. 식물플랑크톤 성장과 번식으로 치어와 작은 동물들이 이들을 포식하며, 다시 큰 동물들이 작은 어류들을 먹는 단계를 고려할 때, 결국 수산업 측면에서 보면 식물플랑크톤이 풍부한 해역에서 좋은 어장이 형성되는 것이다. 더욱이 식물플랑크톤의 성장은 주어진 특정 환경에 좌우되며, 종종 오염, 기후 변화 등과 같은 여러 환경 변동의 지표가 되기도 한다.

해양생산량을 가늠하는 식물플랑크톤 기초생산에 대한 연구를 살펴보면, Furuya *et al* (2003)은 춘계 대륙붕 부근에서 약한 성층과 저염수의 공급으로 규조류 번식이 활발하다고 보고하였으며, 외대륙붕에서

의 높은 색소농도는 규조류가 풍부한 내대륙붕수가 확장되어 나타난다고 하였다. Chang *et al* (2003)은 하계 양자강 연안역에서 규조류가 우점하고 높은 chlorophyll *a* 농도가 나타나며, 쿠로시오 해역으로 갈수록 농도가 급격히 감소한다고 하였다.

동중국해 영양염에 관해서 Wang *et al* (2003)은 양자강 하구 동쪽과 북동쪽 해역은 연중 영양염이 풍부하며, N/P 비로 볼 때 기초생산에 질소보다는 인이 제한요소가 됨을 보고하였다. 또한 기초생산에 대한 영양염 공급에 관한 연구에서 높은 기초 생산은 영양염이 풍부한 해수 공급에 의한 것이며, 그 근원은 주로 양자강에서 유입되는 육상기원 그리고 쿠로시오의 지속적인 용승에 의한 것이라 조사되었다 (Chen, 1996; Edmond *et al*, 1985; Gong *et al.*, 1995; Liu *et al*, 1992).

위의 연구는 제한된 해역에서 단기간 또는 특정 계절에 식물플랑크톤의 분포에 관해 수행되었다. 따라서 광역에서 식물플랑크톤의 계절별 분포 양상을 파악할 수 있는 연구가 필요하며, 이에는 위성 원격탐사가 매우 유용한 도구이다.

위성탐사에 의한 식물플랑크톤 색소 분포에 관한 연구로는 Kim *et al.*, (2002)이 동한난류 주변의 색소농도 변화가 난류의 연안역, 중앙역, 외해역에서 서로 다른 분포양상을 나타내며, 연안역의 경우 부유입자에 의한 영향이 크다는 결과를 밝히는 등 동해에서는 활발한 연구가 진행되고 있다.

그러나 동중국해의 경우, 위성탐사를 통한 기초생물생산에 관한 연구는 아직까지 미흡한 실정으로 몇몇 연구가 수행되었다. Tang *et al* (1998)은 동중국해와 황해 식물플랑크톤 색소의 연변동 및 공

간변화 연구에서 양자강 입구에서 매년 높은 색소 농도를 나타낸다고 보고하였다. 그러나 이러한 높은 색소농도에 미치는 부유물질의 영향에 대한 고찰은 부족하였으며, 계절별 변동양상에 대해서는 파악할 수 없었다. Kiyomoto *et al* (2001)은 동중국해에서 CZCS(Coastal Zone Color Scanner) 및 OCTS(Ocean Color Temperature Scanner) 위성자료와 현장관측 자료를 이용해 chlorophyll *a*와 부유물질 분포를 조사하였다. 이 연구에서는 동계에 위성 chlorophyll *a* 추정에 부유물질의 영향이 크게 작용하여 오류를 범할 수 있고, chlorophyll *a* 농도는 춘·하계에 높다는 결과를 제시하였다. 그러나 chlorophyll *a*의 계절별 분포 양상은 파악하였으나 춘·하계에 높은 농도 분포에 대해서 해양환경과의 관련성을 밝히는 데는 부족하였다.

따라서 앞서 언급한 다양한 인위적, 자연적 해양환경 변화와 그에 따른 기초생산량 변동을 현장관측 자료를 토대로 연구하고, 동시에 위성탐사로써 식물플랑크톤의 색소농도를 지속적으로 파악하는 것은 매우 중요할 것으로 생각된다.

기초생산량 변동은 곧 식물플랑크톤 색소인 chlorophyll *a* 변동으로 연결된다. 따라서 본 연구에서는 동중국해 해역에서의 chlorophyll *a*와 수온, 염분, 영양염 등 해양환경 인자의 분포 특성을 조사, 분석하여 이들 사이의 관계를 구명하고자 한다. 아울러 위성 원격탐사에 의한 chlorophyll *a* 분포 변화를 파악하고 정도 높은 위성 chlorophyll *a* 농도를 추정하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 현장관측과 그 해석

본 연구에서는 국립수산물과학원에서 1995년부터 수행중인 동중국해 북부해역 ($124^{\circ} 00' \sim 127^{\circ} 30' E$, $31^{\circ} 30' \sim 32^{\circ} 30' N$)의 3개 Line (315, 316, 317), 32개 정점에서의 해양 관측 자료를 사용하였다 (Fig. 2.1). 조사 기간은 9년간 (1995~2003년)으로 계절별로 연 4회 (2, 5, 8, 11월)에 걸쳐 수행되었으며, 가장 남쪽에 위치한 317 Line의 조사는 2000년부터 수행되었다. 조사 항목 중 물리-화학적 인자는 수온, 염분, 용존산소 및 부유물질 그리고 영양염류인 용존무기질소(Dissolved Inorganic Nitrate), 인산인(Phosphate), 규산규소(Silicate)이며, 생물학적 인자로는 chlorophyll *a* 등이다.

조사 방법은 표준수심(0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125 m)에서 수온과 염분은 CTD (Seabird SBE 911, 19-plus 및 25)로 관측되었으며, 용존산소는 Winkler-Azide 변법으로 측정되었다. 영양염류 중 질산질소(NO_3-N)는 Cu-Cd 칼럼을 이용한 아질산 환원법, 아질산질소(NO_2-N)는 NED 제 2 염산염법으로 측정되었으며, 질산질소와 아질산질소를 합하여 용존무기질소 (DIN)로 나타내었다. 인산인(PO_4-P)과 규산규소(SiO_2-Si)는 몰리브덴 청법으로 발색하여 측정되었다 (APHA AWWA WPCF, 1985).

부유물질은 무게를 알고 있는 45 mm GF/C 여과지를 이용하여 정점에 따라 해수 0.5~1 ℓ를 현장에서 여과한 후 건조기에서 105℃로 2시간 동안 건조한 다음 데시케이터에서 30분간 방냉하여 무게를 측정

후 여과전과 후의 무게차로 계산되었다.

chlorophyll *a*는 표준수심에서 정점별로 현장에서 해수를 1~2ℓ 채수하여 45 mm GF/F 여과지 (공극 0.45 μ m)로 여과하였다. 여과된 시료는 분석시까지 초저온 액체 질소에 보관하고 실험실에서 90% acetone 10 ml를 가하여 냉암소에서 24시간 동안 색소를 추출하였다. 이후 chlorophyll *a* 농도는 형광광도계(Fluorometer, Turner Design Model 10-AU)를 사용하여 시료에 5% 염산액 1~2 방울을 첨가한 후 첨가전과 후의 형광 값을 측정하였다. 이것을 형광광도법 (fluorometric method)으로 정량적인 농도 값을 구하였다 (Parsons, *et al.*, 1984).

동중국해의 해황을 알아보기 위해 9년간(1995~2003) 현장 관측된 수온, 염분, 용존산소, 영양염류 그리고 4년간(2000~2003) 관측된

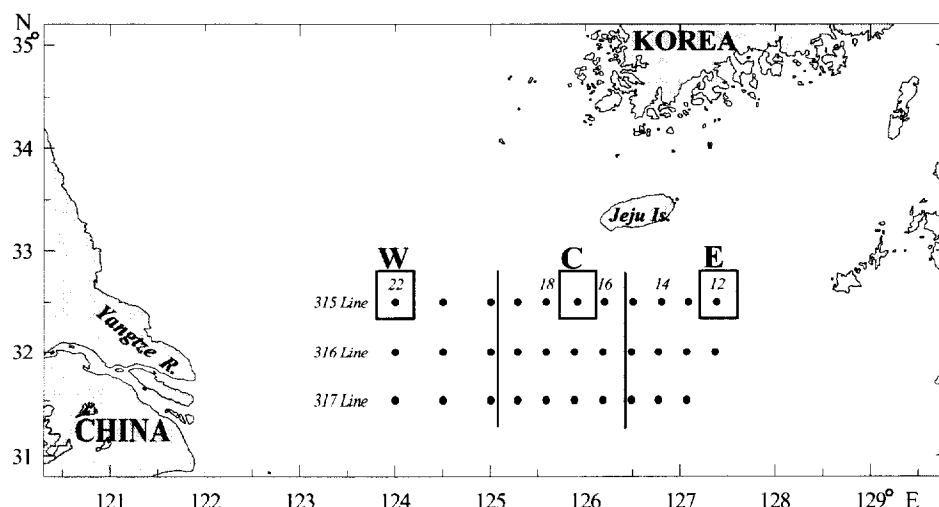


Fig. 2.1. Map shows the survey area and measuring stations.

E : East area (st. 12); C : Center area(st. 17); W : West area(st. 22)

부유물질, 식물플랑크톤 색소인 chlorophyll *a*를 정점별, 수심별로 계절 평균값을 구하였다.

4 계절에 해당하는 2월(동계), 5월(춘계), 8월(하계), 11월(추계)에 대한 수괴의 계절 변화 특성을 파악하기 위해 315 Line의 east area(E)인 정점 12, center area (C)인 정점 17 그리고 west area(W)인 정점 22를 선정하여 시간에 따른 T-S diagram (T-S-t diagram)으로 연구해역의 수괴 변화 특성을 분석하였다.

계절별 chlorophyll *a*의 변화와 수온, 염분, 용존산소, 영양염류간의 관계성을 검토하기 위해 chlorophyll *a*에 대한 각 항목과의 관계를 상관계수를 이용해 조사하였으며, 상관계수는 가장 일반적으로 사용되는 표본 상관계수인 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient), 식 (1)을 이용하였다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

여기서 x_i 와 y_i 는 각각 동일한 시점의 chlorophyll *a*와 해양 인자 (수온, 염분 등)이며, $\bar{x}$ 와 $\bar{y}$ 는 각각의 평균치를 나타낸다. 위 식에서 분자는 chlorophyll *a*와 해양인자간의 공분산 (covariance)이며, 분모는 둘간의 표준편차(standard deviation)의 곱으로 표현된다.

2.2. 흡광조사

동중국해에서 3년간 (2000~2002년) 계절별(2, 5, 8, 11월)로 흡광계수

를 측정하여 해수 광(光)특성을 조사하였다.

해수중의 입자성 부유물질에 의한 흡광계수 (a_p)는 해수 0.5~1 ℓ를 25 mm Whatman GF/F(glass-fiber filter)로 여과한 후 분광광도계(spectrophotometer)를 사용해 300~800 nm까지 1 nm 간격으로 흡광도를 측정하여 흡광계수(absorption coefficient) 값을 구하였다(Truper and Yentsch, 1967). 또한 유기쇄설입자(detritus)에 의한 흡광계수 a_d 를 측정하기 위해 a_p 측정을 하고난 여과지를 10ml, 100% 메탄올 용액에 약 1 시간 정도 두어 색소를 제거한 후 유기쇄설입자에 의한 흡광을 측정하였다.

식물플랑크톤에 의한 흡광계수 a_{ph} 는 $a_p - a_d$ 로 계산하였으며, 비흡광계수(specific absorption coefficient) 즉, chlorophyll *a* 당 흡광계수 a_{ph}^* 는 $a_{ph}^* = (a_{ph}) / tchl-a$ 로 계산하였다(Kishino *et al.*, 1985). 여기서 a_{ph} 는 식물플랑크톤에 의한 흡광계수이고, $tchl-a$ 은 총 chlorophyll *a* 량이다.

2.3. 위성탐사

해양수색 위성자료는 국립수산과학원에서 수신하고 있는 Orbview 2/SeaStar 위성에 탑재된 해수색(ocean color) 센서인 SeaWiFS 에서 추정된 chlorophyll *a* 자료와 NASA에서 제공한 월별 chlorophyll *a* 자료를 사용하였다. 국립수산과학원의 SeaWiFS 위성자료는 2000~2003년의 일별자료를 이용하였으며, NASA에서 제공하는 자료는 2002년 월별 chlorophyll *a* 자료를 이용하였다.

SeaWiFS는 지구 해수표면을 매일 2회 관측하고 있으며, 가시광 영역의 특정 파장대를 이용하여 해수로부터 반사되어 나오는 복사휘도를 측정한다. SeaWiFS의 밴드(band)는 8개로 6개는 가시영역이고

2개는 근적외선 (near infrared, NIR) 영역이다. 가시영역 band의 중심파장은 412, 443, 490, 510, 555, 670 nm이고, chlorophyll *a* 농도 분석에는 2, 3, 4, 5번 band, 부유물질 농도 분석에는 5번 band를, 대기 보정에는 6, 7, 8번 band가 주로 이용된다 (Table 2.1).

SeaWiFS 위성자료는 지구 표면으로부터 수신된 digital 신호 값들인 Level-0 자료와 Level-0로부터 광 signal의 크기인 radiance 값으로 변환된 Level-1 자료로써 이는 단순히 복사보정만이 이루어진 단계이다. 위성자료에서 우리가 알고자하는 해석정보를 얻기 위해서는 Level-1 자료에 센서보정, 대기보정 및 다양한 생물광학적 알고리즘들

Table 2.1. Normal radiometric parameters for SeaWiFS

Spectral Band	Wavelength range (nm)	Center Wavelength (nm)	Primary Use
1	402 ~ 422	412 (violet)	Gelbstoffe (yellow substance)
2	433 ~ 453	443 (blue)	Chlorophyll Absorption
3	480 ~ 500	490 (blue-green)	Pigment Concentration
4	500 ~ 520	510 (blue-green)	Chlorophyll Absorption
5	545 ~ 565	555 (green)	Sediments
6	660 ~ 680	670 (red)	Atmospheric correction Aerosols
7	745 ~ 785	765 (near IR)	"
8	845 ~ 885	865 (near IR)	"

을 적용시킨 Level-2 자료를 이용한다. 이는 다시 일, 주, 월, 년 단위로 격자 cell 들을 통계적으로 모아서 9 km × 9 km 격자 간격 또는 0.09° × 0.09° 격자 간격의 global gridded data인 Level 3 자료로 처리된다.

본 연구에서는 위성관측 chlorophyll *a* 자료의 신뢰성을 파악하고자 위성자료에서 대기보정 및 기하보정이 완료된 상태인 Level 2 자료를 Terascan 시스템 소프트웨어 (SeaSpace, 1993)로 처리한 chlorophyll *a* 추정 값과 동일 시점의 현장관측 chlorophyll *a* 값 간의 관계성을 분석하였다. 또한 월평균 chlorophyll *a* 자료로는 Level 3 자료를 사용하였으며, 이들 자료는 NASA에서 SeaWiFS 자료를 분석하기 위해 개발된 종합 영상분석 패키지인 SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System) 프로그램으로 처리하였다.

광역의 정량화된 chlorophyll *a* 농도 분포를 파악하기 위해 SeaWiFS 해양수색 관측 위성자료에 SeaBAM (SeaWiFS Bio-Optical Algorithm Mini-Workshop)의 OC2 (Ocean Color 2) 알고리즘인 식 (2)를 이용하여 위성 chlorophyll *a* 값을 산출하였다 (O'Reilly *et al.*, 1998).

$$Chlorophylla = 10^{(a_0 + a_1 * R + a_2 * R^2 + a_3 * R^3)} + a_4 \quad (2)$$

여기서, $a_0=0.3410$, $a_1=-3.0010$, $a_2=2.8110$, $a_3=-2.0410$, $a_4=-0.0400$ 의 계수 값이며, R 은 SeaWiFS 위성의 원격탐사반사도(remote sensing reflectance)로 490 nm 파장에서의 반사도 R_{rs490} 과 555 nm 파장에서의 반사도 R_{rs555} 의 비(ratio)이며, 식 (3) 같이 표현된다.

$$R = Log(R_{rs490}/R_{rs555}) \quad (3)$$

3. 결 과

3.1. 동중국해 해황특성

3.1.1. 수온, 염분 및 수괴분석

• 수온분포

동중국해에서 chlorophyll *a* 분포에 영향을 미칠 수 있는 해황을 파악하기 위해 9년간 (1995~2003)의 수온 자료를 분석하여 표면수온 분포도를 Fig. 3.1.1에, 연직 수온분포도를 Fig. 3.1.2에 각각 나타내었다. 이들 분포도는 국립수산과학원에서 관측한 수온자료를 계절별, 수심별로 9년간의 관측 값을 평균한 것이다. 여기서 서쪽해역은 125°E 이서(W역), 중앙부해역은 $125.5^{\circ}\sim 126.5^{\circ}\text{E}$ (C역), 동쪽해역은 126.5°E 이동(E역)으로 구분하였다. 2, 5, 8, 11월을 각각 동계, 춘계, 하계 및 추계로 정의하였다.

표면수온의 계절 및 수평 분포를 조사한 결과, 연중 최저치를 나타내는 동계 수온은 $9\sim 17^{\circ}\text{C}$ 로서 W해역에서는 10°C 내외로 가장 낮은 값을 보였다 (Fig. 3.1.1 (a)). 대마난류수의 영향이 우세한 E해역에서는 17°C 내외였고, C해역에서는 상기 두 해역의 수계가 서로 만나 13°C 등온선을 중심으로 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 의 강한 수온전선대가 남동-북서 방향으로 형성되었다. 춘계의 경우 표면수온은 태양복사량 증가와 더불어 E해역에서 20°C 이상, W해역에서 17°C 이하의 수온분포를 나타내었다 (Fig. 3.1.1 (b)). 하계에는 전 해역에서 약 28°C 등온선이 동서방향으로 뻗어있는 양상을 보였다 (Fig. 3.1.1 (c)). 추계에는 $20\sim 23^{\circ}\text{C}$ 의 동고서저형(東高西低型) 수평 수온분포를 보였다 (Fig. 3.1.1 (d)).

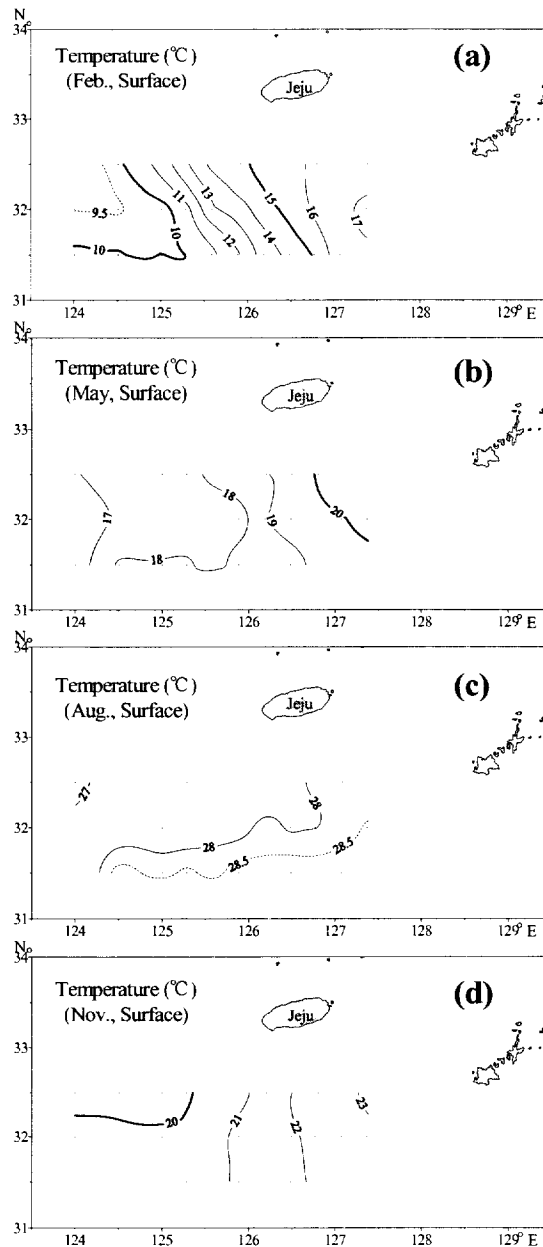


Fig. 3.1.1. Horizontal distributions of mean surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995-2003).

계절별 수온의 연직 분포를 Fig. 3.1.2에 나타내었다. 동계의 경우 표층부터 저층까지 균일한 수온분포를 나타내었다. E해역(정점 14 이동 외해역)에서는 15℃ 이상의 고온을, W해역(정점 20 이서 연안역)에서는 12℃ 이하의 저온을, 그리고 C해역(정점 16~18)에서는 11~15℃의 수온을 각각 나타내었다. 차가운 중국 대륙연안수와 따뜻한 대마난류수가 만나 수온 12℃를 중심으로 약한 전선이 형성되었다 (Fig. 3.1.2 (a)).

태양복사량이 증가하는 계절인 춘계의 경우 혼합층이 얕아지면서 315 Line 정점 22~18점, 316 Line 정점 20~16점, 317 Line에서는 정점 19~15에 걸쳐 20~30 m 층에서 15℃ 등온선을 중심으로 수온약층이 형성되었으며, 저층에는 수온 13℃ 이하의 냉수괴가 분포하였다. 이는 동계동안의 표면냉각으로 전수심에서 균일한 수온 분포를 보이다가 춘계에 표면이 서서히 가열되면서 따뜻한 연안수와 외양수 사이에 설상형(舌狀形)으로 하계에까지 잔존하고 있다 (Fig. 3.1.2 (b)).

하계의 표면수온은 27~28℃로 전해역에서 높은 값을 나타내었으며, 10~30 m 수층의 25℃ 등온선을 중심으로 강한 수온약층이 형성되었다. 수심 약 50 m 이하에서 15℃ 이하(317 Line은 17℃ 이하)의 저층 냉수가 존재하고 있다. 이는 춘계의 15℃ 등온선(317 Line은 17℃ 등온선))이 E해역과 서쪽 중국연안역의 수온 상승으로 인하여 그 영역이 좁아진 황해 저층냉수의 잔존형태를 유지하고 있다 (Fig. 3.1.2 (c)).

북서계절풍의 영향으로 혼합층이 깊어지는 계절인 추계의 경우 서쪽해역(정점 19 이서 연안역)의 전 수심 및 E해역의 50 m 층까지 표층수의 혼합으로 인한 균일한 수온분포를 나타내었다. 그리고 수심 75 m의 저층에는 약 20℃ 등온선을 중심으로 수온약층이 존재하고 있다 (Fig. 3.1.2 (d)).

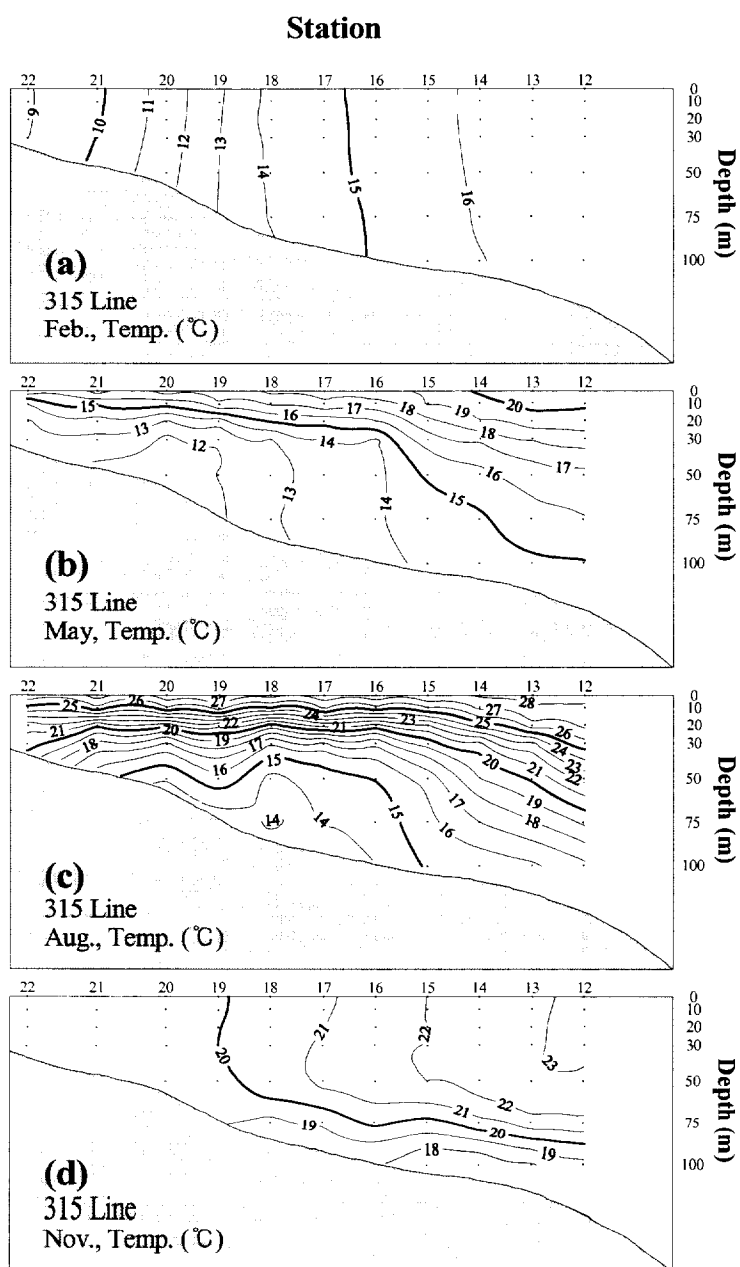


Fig. 3.1.2. Vertical distributions of mean temperature (°C) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995~2003).

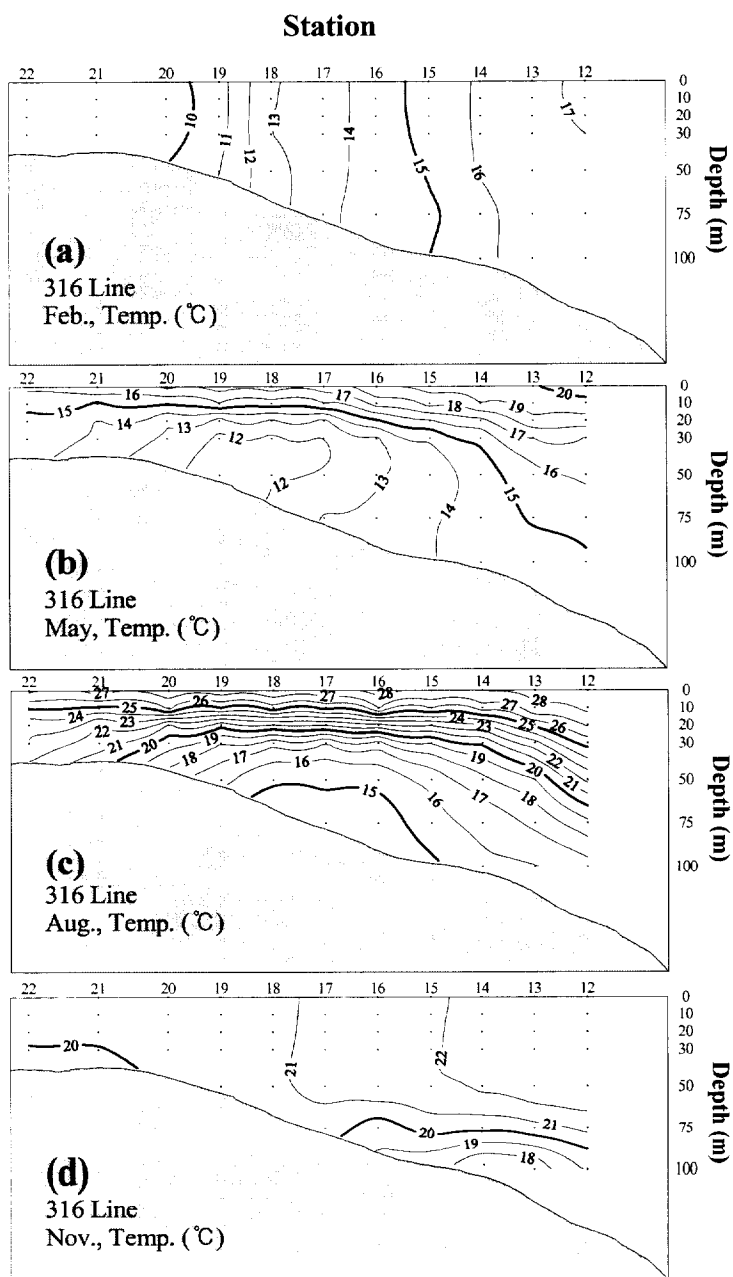


Fig. 3.1.2. Continued, except for 316 line.

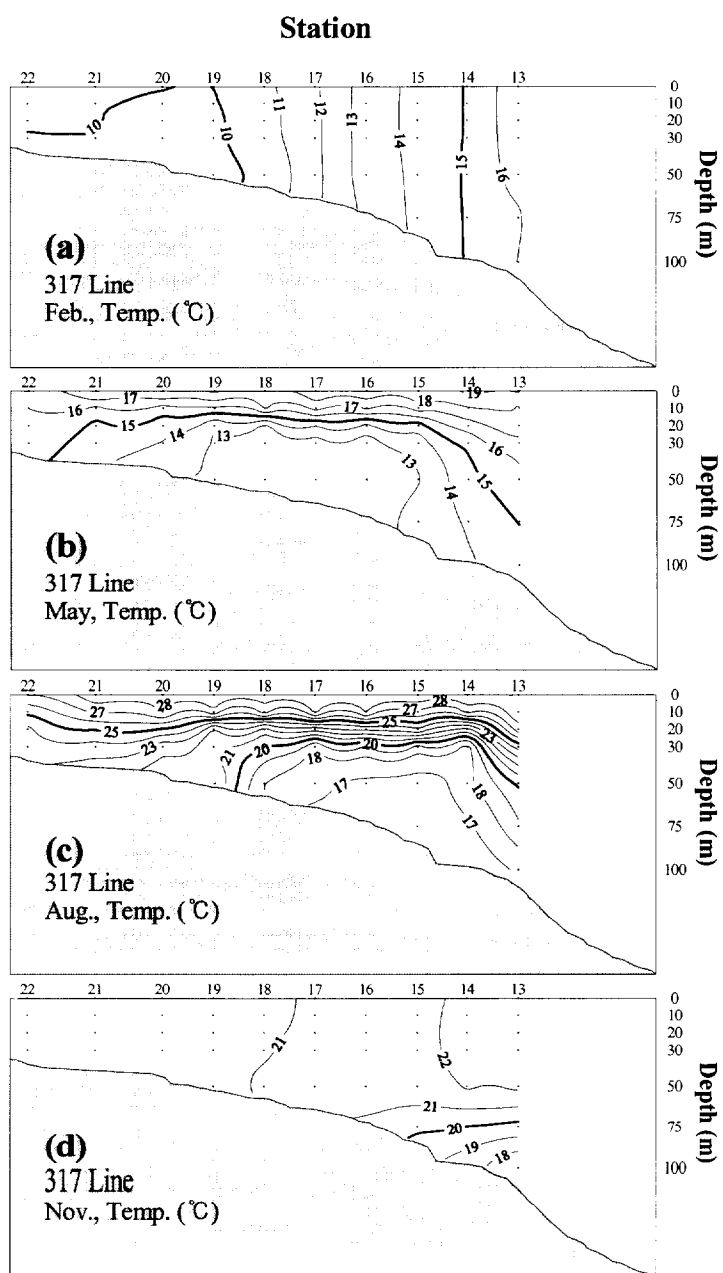


Fig. 3.1.2. Continued, except for 317 line.

• 염분분포

연안해역에서 염분은 대륙이나 연안에서 유출되는 담수의 영향 때문에 수괴 기원 등을 파악하는데 있어서 수온보다 오히려 더 중요시되는 인자중의 하나이다. 동중국해에서 염분 분포상태를 파악하기 위해 9년간 (1995~2003)의 염분자료를 분석하여 표면의 수평 염분분포도를 Fig. 3.1.3에, 연직 염분분포도를 Fig. 3.1.4에 각각 나타내었다. 이들 분포도는 국립수산과학원에서 9개년간 관측한 염분자료를 계절별, 수심별로 평균한 값이다.

표면 염분의 계절 및 수평 공간 분포를 조사한 결과, 연중 최고치를 나타내는 동계의 표면염분은 32.6~34.4 psu로서 대마난류수의 영향이 우세한 E해역에서는 34.4 psu 이상의 높은 염분 값을 보였으며, 중국 대륙 연안역인 W해역은 하천수 유입에 의해 형성된 저염 수계인 중국 대륙연안수의 영향이 우세하여 32.6 psu 이하의 염분 값을 나타내었다 (Fig. 3.1.3 (a)). C해역에서는 상기 두 해역의 수계가 서로 만나 33.6 psu 등염선을 중심으로 염분전선이 남동-북서 방향으로 형성되었다.

강수량이 증가하는 계절인 춘계의 경우 표면염분은 31.0~33.6 psu로 동계에 비해 낮게 나타났다. E해역에서 33.0 psu 이상, 서쪽 해역에서 32.0 psu 이하의 염분분포를 나타내었다 (Fig. 3.1.3 (b)).

강수량 증가와 더불어 육상의 담수 유입이 증가하는 계절이며, 연중 최저 염분 값을 나타내는 하계의 염분은 28.0~32.4 psu로서 춘계에 비해 1.0~3.0 psu의 저염분 값을 보였다. 126.5°E를 기준으로 중국 대륙쪽 해역은 저염의 하천수 유입으로 30.0 psu 이하의

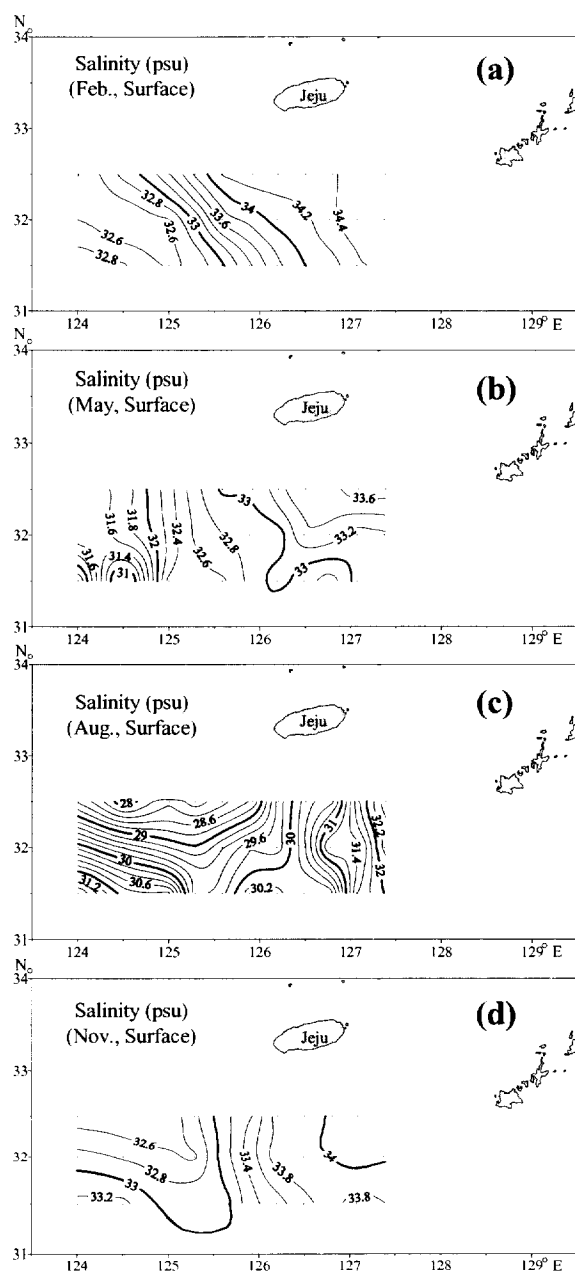


Fig. 3.1.3. Horizontal distributions of mean surface salinity (psu) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995 ~ 2003).

값을 나타내었고, E해역은 저염의 하천수와 고염의 난류수계가 혼합되어 30.0~32.0 psu로 나타났다 (Fig. 3.1.3 (c)).

추계에는 32.6~34.0 psu의 동고서저형 수평 염분분포를 보였다. 중국 대륙연안수역인 W해역에서 33.0 psu 이하의 설상(tongue shape) 형태로 나타났으며, 대마난류수역인 E해역에서는 약 34.0 psu 이상의 값을 나타내었다 (Fig. 3.1.3 (d)).

계절별 염분의 연직 분포를 Fig. 3.1.4에 나타내었다. 혼합층이 깊어진 동계에는 표층에서 저층까지 균일한 분포를 보이고, E해역(정점 13 이동 외해역)에서는 34.4 psu 이상의 고염을, W해역(정점 21 이서, 연안역)에서는 33.0 psu 이하의 값을 나타내었다 (Fig. 3.1.4 (a)). 그리고 중국 대륙연안수계와 대마난류수계가 서로 만나는 해역(315 Line 정점 18~21, 316 Line 정점 17~19, 317 Line 정점 15~18)에서 33.0~34.0 psu의 염분 분포를 나타내었고 33.6 psu를 중심으로 염분전선이 형성되었다.

춘계의 경우 중국대륙측인 W해역(정점 21 이서, 연안역) 표층에서는 32.0 psu 이하의 염분 값을 보였다 (Fig. 3.1.4 (b)). 저염의 양자강 유출수 영향이 우세한 하계의 경우 표면에서는 30.0 psu 이하의 낮은 값을 보였고, E해역(정점 14 이동, 외해역) 수심 약 75 m 이심에서는 34.0 psu 이상의 높은 염분 값을 보였다 (Fig. 3.1.4 (c)). 315 Line 정점 16~22, 316 Line 정점 22~15 그리고 317 Line 정점 19~14에서는 31.0 psu를 중심으로, 315 Line 정점 16~14, 316 Line 정점 15~13 그리고 317 Line 정점 14~13에서는 32.0 psu를 중심으로 표면에서 30m 층까지 매우 강한 염분약층이 형성되었다.

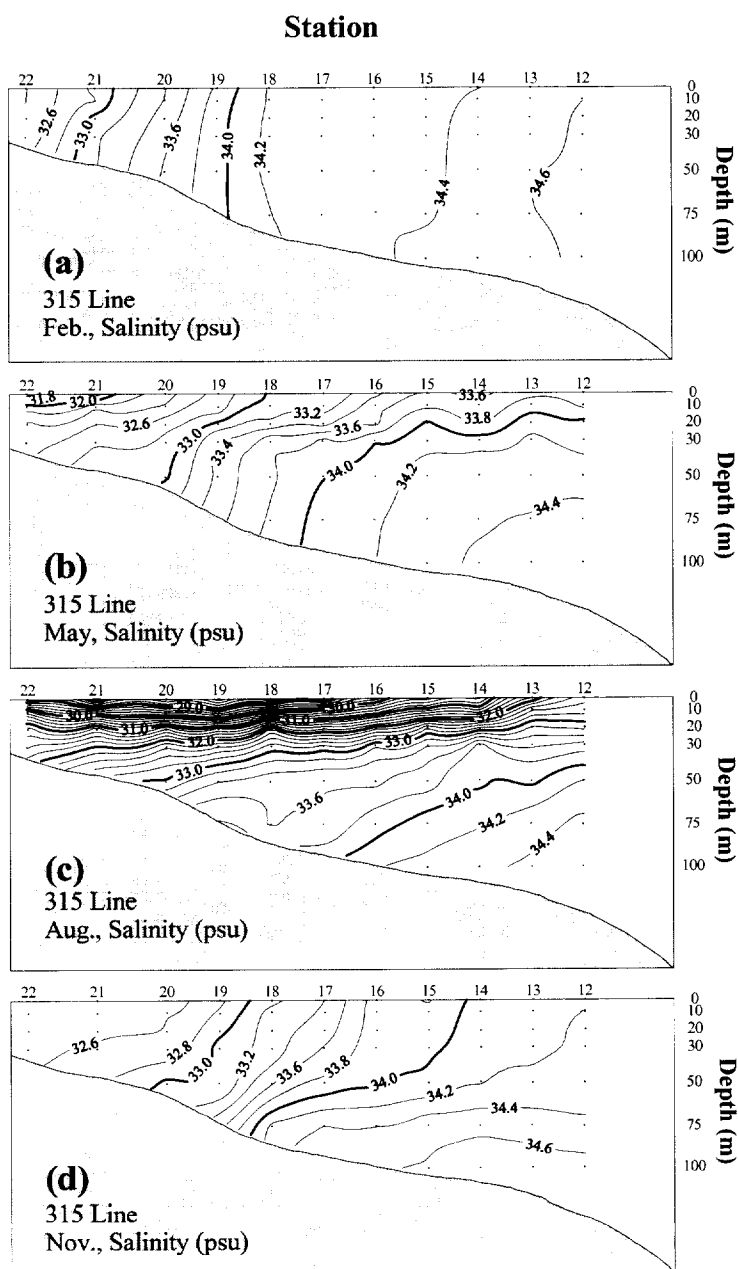


Fig. 3.1.4. Vertical distributions of mean salinity (psu) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9years (1995 ~ 2003).

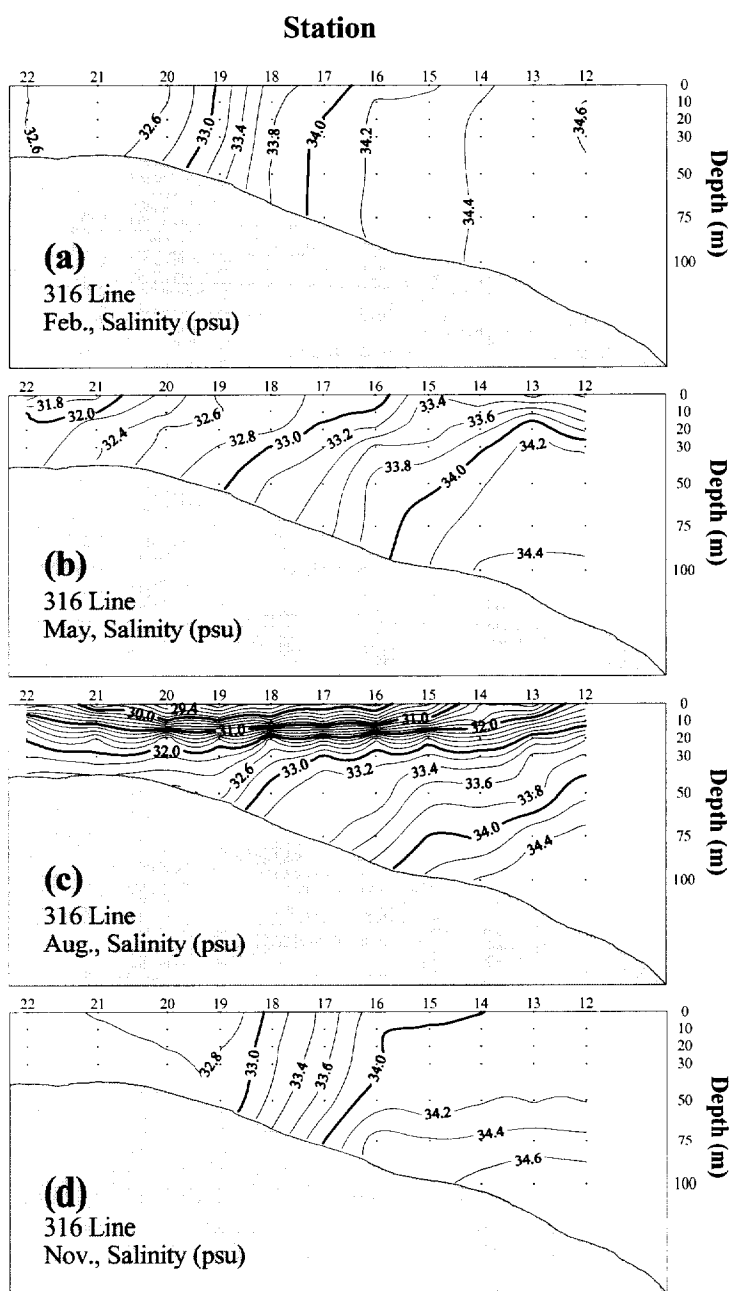


Fig. 3.1.4. Continued, except for 316 line.

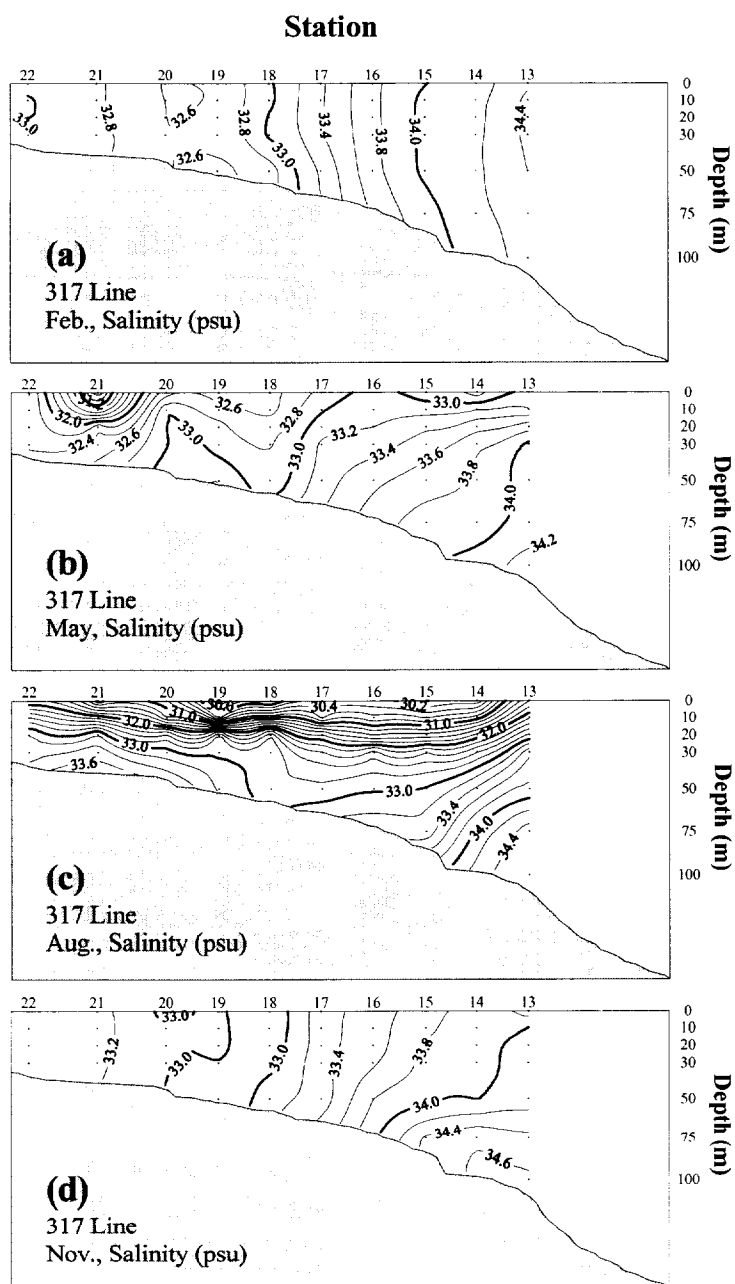


Fig. 3.1.4. Continued, except for 317 line.

표면냉각과 북서계절풍의 영향으로 대류작용에 의한 연직혼합이 활발한 추계의 경우 W해역(정점 19 이서, 연안역)에서는 33.0 psu 이하, E해역(정점 14 이동, 외해역) 50m 이천에서는 34.0 psu 이상의 염분 분포를 보였다 (Fig. 3.1.4 (d)). 표면에서 수심 50 m 까지는 표층수의 혼합으로 인해 연직적으로 균일한 염분 분포를 보이고, 수심 75 m의 저층에서는 약 34.4 psu 등염선을 중심으로 약한 염분약층이 존재하고 있다.

• 수괴 분석

동중국해 해수특성의 계절변화를 파악하기 위하여 9개년간(1995~2003) 평균 계절별 (2, 5, 8, 11월) 수온-염분-시간 (T-S-t) diagram을 Fig. 3.1.5에 나타내었다. 여기서 정점 315-12, 정점 315-17 및 정점 315-22의 3개 해역을 각각 동쪽(E), 중앙부(C) 및 서쪽(W)해역으로 구분하여 나타내었다.

수괴의 계절변동은 3개 해역 모두에서 뚜렷하였으며, 계절변동은 수온 변화 이외에도 염분 변화가 C 및 W해역에서 변동에 큰 요인으로 작용하였다. 대마난류수의 영향이 우세한 E해역에서는 염분 32.5~34.5 psu 이고, 수온 16.5~28.0 °C 범위로 염분보다는 주로 수온의 계절변화에 의한 수괴의 변동이 지배적이다. 계절별로 수온은 춘계(5월)와 하계(8월) 사이에 7°C로 가장 크고, 염분은 하계(8월)와 추계(11월) 사이에 약 1.5 psu 차로 상대적으로 다른 시기에 비해 크게 나타났다. W해역은 염분은 28.5~32.5 psu 이고, 수온은 9~27°C 범위로 하계에 27°C, 28.5 psu의 고온, 저염, 그 외 시기는

다른 두 해역에 비해 1.5°C, 1.5 psu 낮은 저온, 저염을 나타내었다. C 해역의 염분은 28.5~34.3 psu 이고, 수온은 15~27°C로 수온보다는 염분의 계절 변동 값이 크게 나타났다. 즉 염분은 8월에 서쪽해역과 유사한 28.5 psu로서 중국대륙 연안수의 특징이 뚜렷하고 동계(2월) 수온은 대마난류수와 유사한 동쪽과 서쪽 해역의 중간적인 특징을 나타내었다 (Fig. 3.1.5).

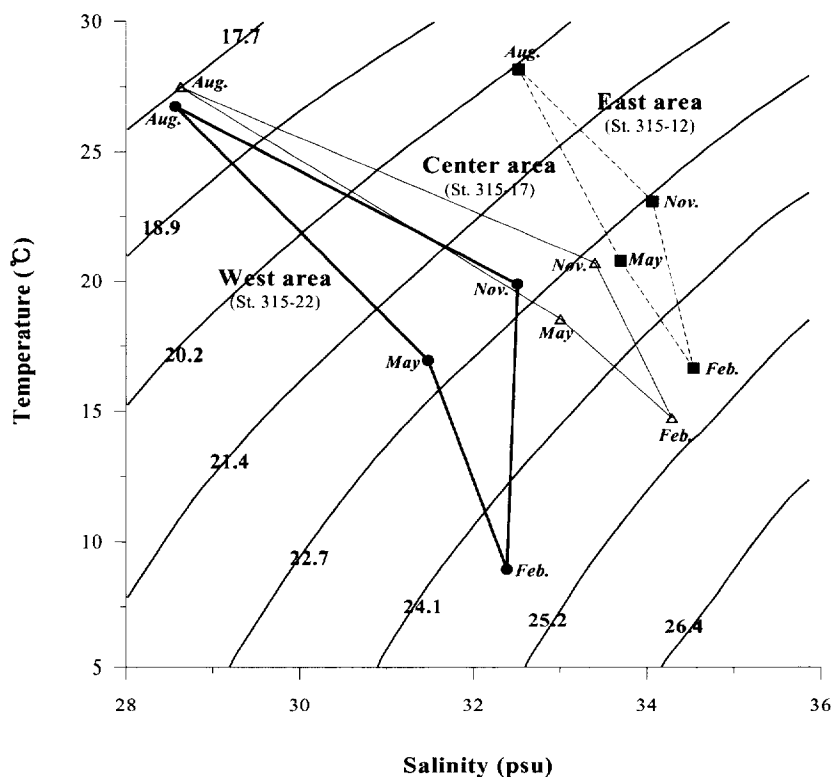


Fig. 3.1.5. Temperature-salinity-time (T-S-t) diagrams for the East China Sea waters.

3.1.2. 영양염 분포

해양에서 영양염은 식물플랑크톤의 번식에 빛(光)과 함께 매우 중요한 요소이다. 동중국해에서의 질산염(용존무기질소, DIN), 규산염(규산규소, Silicate) 및 인산염(인산인, Phosphate) 자료를 분석하여 표면의 수평 영양염 분포도를 각각 Fig. 3.1.6, Fig. 3.1.8, Fig. 3.1.10에, 연직 분포도를 Fig. 3.1.7, Fig. 3.1.9, Fig. 3.1.11에 각각 나타내었다. 이들 분포도는 국립수산과학원에서 9개년간(1995~2003) 관측한 영양염 자료를 계절별, 수심별로 평균한 값이다.

표면 질산염의 계절 및 수평 공간 분포를 조사한 결과, 동계의 경우 5~14 μM 로 수심이 깊은 E해역에서는 5 μM 이하로 낮은 값을 보였으며, 수심이 얇은 W해역은 10 μM 이상의 높은 분포를 나타내었다 (Fig. 3.1.6 (a)). 상기 두 해역의 경계인 C 해역에서는 약 8 μM 를 중심으로 남동에서 북서 방향으로 조밀한 질산염 분포를 나타내었다. 춘계의 경우 표면 질산염은 3~9 μM 로 동계에 비해 낮게 나타났다. E해역에서 3 μM 이하이고, W해역에서 약 5 μM 이상의 조밀한 질산염 분포를 나타내었다 (Fig. 3.1.6 (b)). 하계의 질산염 농도는 2~5 μM 범위로, 중국 대륙연안수역인 W해역은 약 4 μM 내외의 농도 값이고, E해역에서는 2 μM 이하로 낮게 나타났다 (Fig. 3.1.6 (c)). 추계에는 3~11 μM 의 서고동저형 분포이고, 수심이 깊은 E해역에서는 약 4 μM 이하로 하계보다 2 μM 정도 높고, 중국 대륙연안수역인 W해역은 7 μM 이상으로 하계보다 4~6 μM 높은 농도 값이었다 (Fig. 3.1.6 (d)).

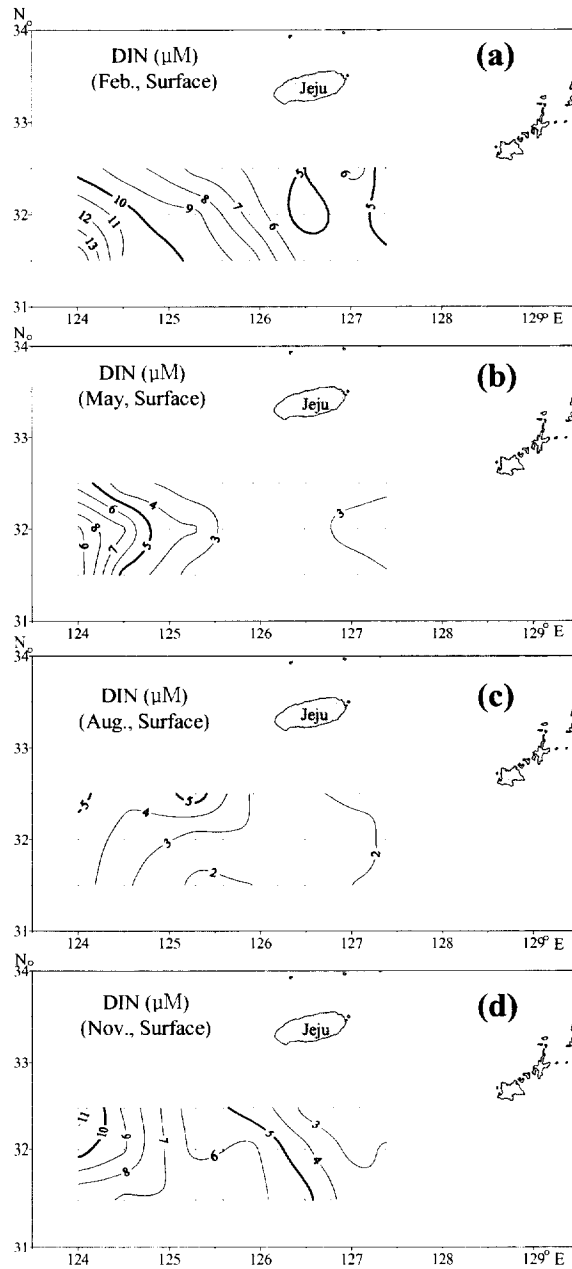


Fig. 3.1.6. Horizontal distributions of mean surface DIN (μM) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995 ~ 2003).

계절별 질산염의 연직 분포를 Fig. 3.1.7에 나타내었다. 동계에는 표층에서 저층까지 거의 균일한 분포를 보이고, 정점 15 이동 외해역에서는 약 5~6 μM 이하의 저농도를, 정점 20 이서, 연안역에서는 7 μM 이상의 값을 나타내었다 (Fig. 3.1.7 (a)). 특히 316선 정점 20 이서와 317 Line 정점 18 이서 해역에서는 10 μM 이상의 고농도 분포를 보였다.

춘계의 경우 정점 21 이서 연안역과 정점 13 이동 외해역의 저층에서는 10 μM 이상의 고농도 값을 보였고, 중앙 부근은 상하층간에 약한 질산염 약층이 형성되었다 (Fig. 3.1.7 (b)).

저염의 양자강 유출수 영향이 우세한 하계의 경우 춘계보다 강한 상하층 질산염 약층이 형성되고, 약층은 317 Line이 다른 두 Line 보다 뚜렷하였다. 전체적으로 수심이 얕은 서쪽과 수심이 깊은 동쪽의 저층에서 10 μM 이상의 고농도를 보였다. 특히, 316 Line의 정점 17 부근의 저층에서 5 μM 이하의 저농도가 나타나는 것이 특징적이다 (Fig. 3.1.7 (c)).

추계에는 317 Line을 제외하고 정점 21 이서 연안역에서는 약 10 μM 이상으로 표층에서 저층까지 균일한 값이고, 317 Line의 정점 16~19 50 m 이심층에서 10 μM 이상의 고농도를 보였다 (Fig. 3.1.7 (d)). 315와 316 Line의 정점 15 이동 해역 50 m 이심에서는 약 8 μM 농도 분포 중심으로 강한 약층이 존재하였다.

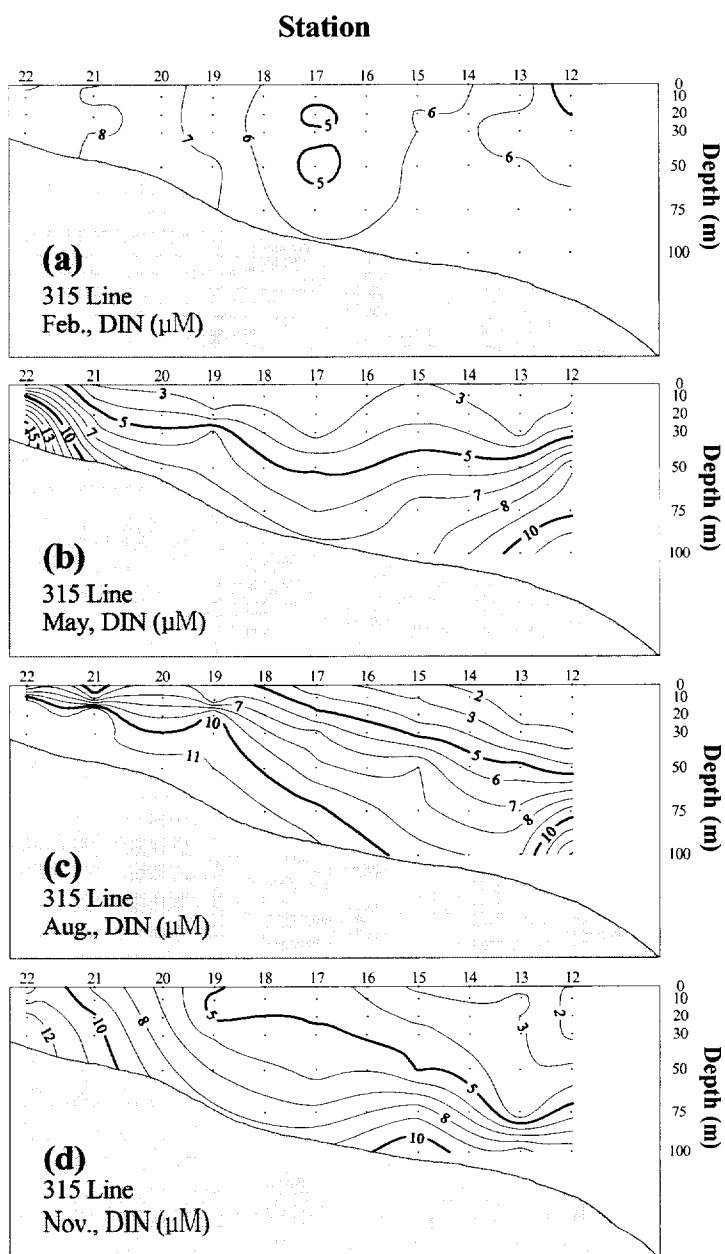


Fig. 3.1.7. Vertical distributions of mean DIN (μM) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995 ~ 2003).

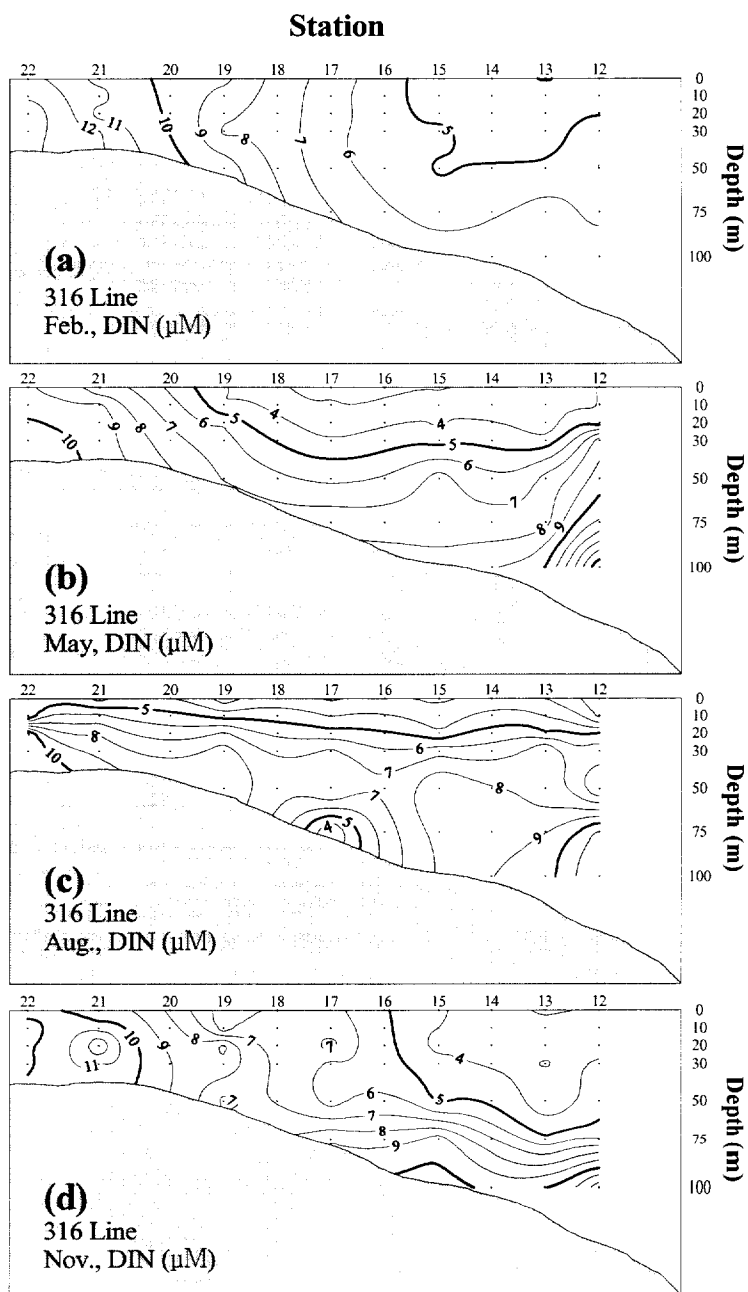


Fig. 3.1.7. Continued, except for 316 line.

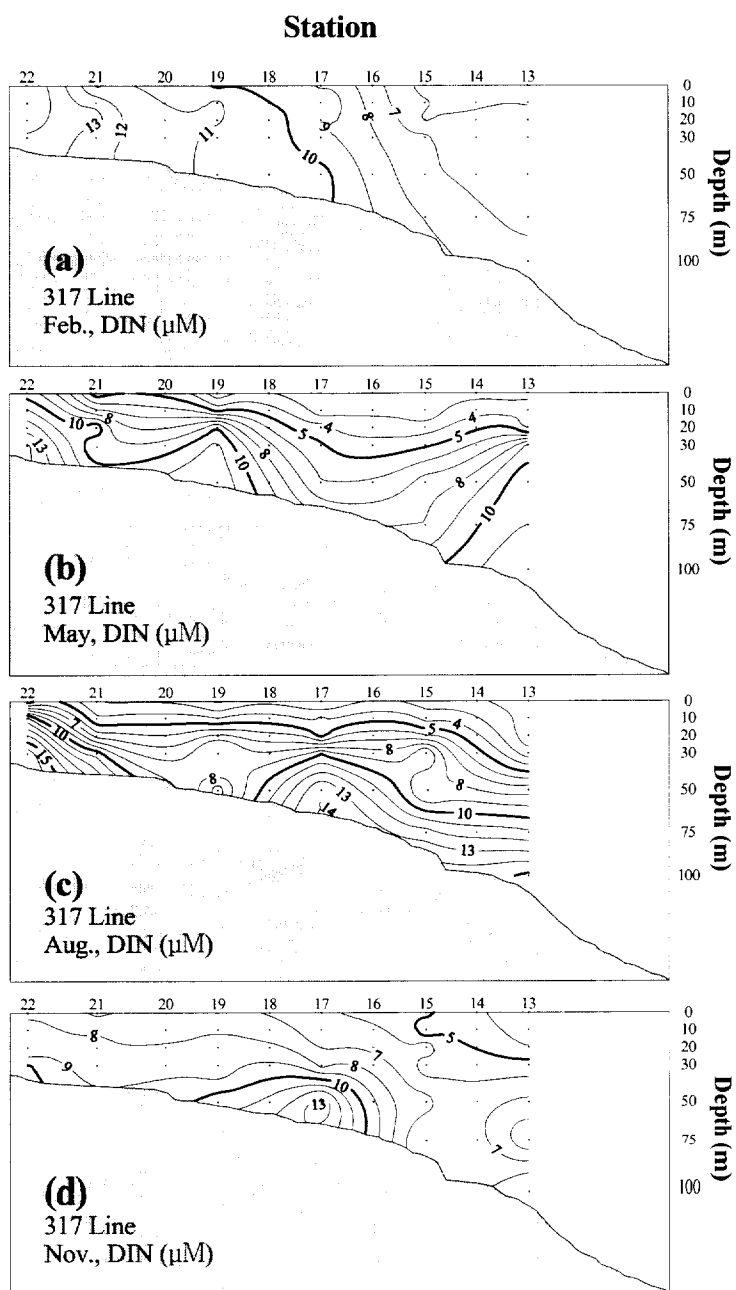


Fig. 3.1.7. Continued, except for 317 line.

표면 규산염의 계절별 수평 분포를 Fig. 3.1.8에 나타내었다. 동계의 경우 6~14 μM 로 대마난류수의 영향이 우세한 E해역에서는 6 μM 이하로 낮은 값이고, 수심이 얇은 W해역에서는 약 13 μM 이상의 높은 분포였다 (Fig. 3.1.8 (a)). 두 해역의 경계인 C해역에서는 약 10 μM 를 중심으로 남동에서 북서방향으로 조밀한 분포를 나타내었다. 춘계의 경우 6~12 μM 범위로 E해역은 6 μM 이하의 분포이고 W해역은 약 9 μM 이상의 높은 규산염 농도를 나타내었다 (Fig. 3.1.8 (b)). 하계의 규산염 농도는 4~8 μM 범위로, 춘계보다 낮은 농도를 보였고, W해역이 E해역보다 높은 경향을 나타내었다 (Fig. 3.1.8 (c)). 추계에는 4~16 μM 범위로 125°E 이동은 8 μM 농도를 중심으로 0.04 $\mu\text{M}/\text{km}$ 의 강한 전선이 형성되고, 대륙연안수역인 W해역에 12 μM 이상의 고농도를 나타내었다 (Fig. 3.1.8 (d)).

계절별 규산염의 연직 분포를 Fig. 3.1.9에 나타내었다. 동계에는 표층에서 저층까지 거의 균일한 분포이고, 정점 15 이동 외해역에서는 약 8 μM 이하로 3개 Line에서 10 μM 내외를 중심으로 연안과 외해역의 구분이 뚜렷하였다. 또 정점 20 이서 연안역에서는 10 μM 이상의 값을 나타내었다 (Fig. 3.1.9 (a)). 춘계에는 동계의 연직 방향의 혼합이 사라지고 상하층에 약한 규산염의 약층이 형성되기 시작하였다. 3개 Line에서 10 μM 을 기준으로 볼 때 수심이 깊은 정점 17 이동은 315 Line으로 갈수록 얇은 층에 형성되는 경향을 보였다 (Fig. 3.1.9 (b)). 하계의 경우 강한 규산염 약층이 형성되고 수심이 얇은 317 Line이 수심이 깊은 315 Line 보다 성층이 강하였다. 또한 수심이 깊은 동쪽의 저층 농도도 317 Line에서 315 Line으로

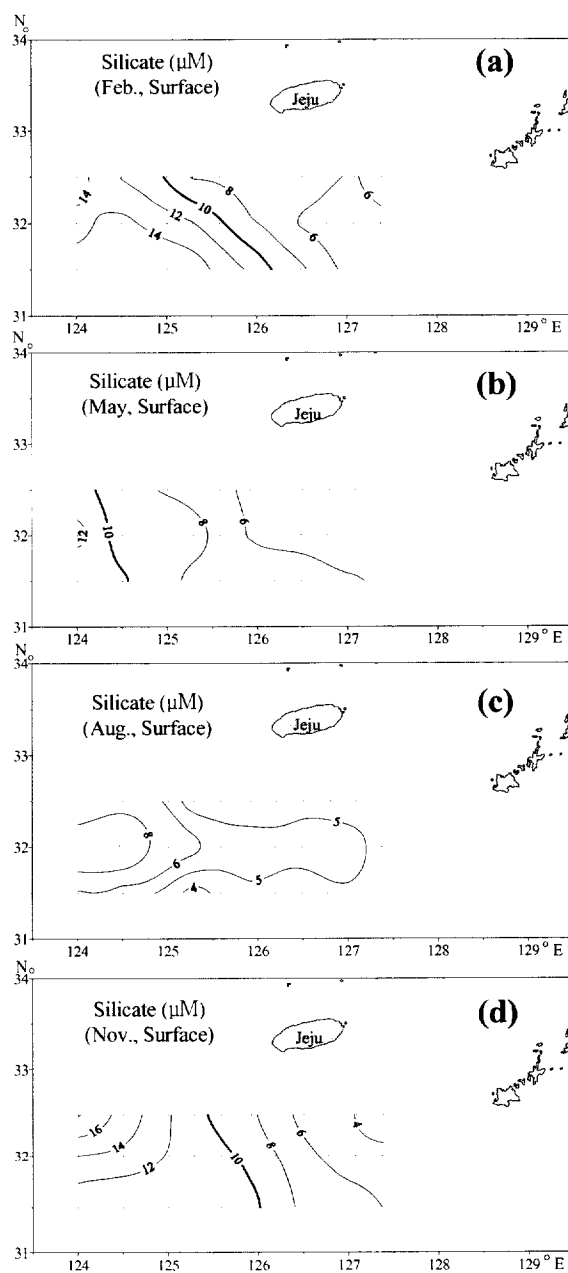


Fig. 3.1.8. Horizontal distributions of mean surface silicate (μM) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995 ~ 2003).

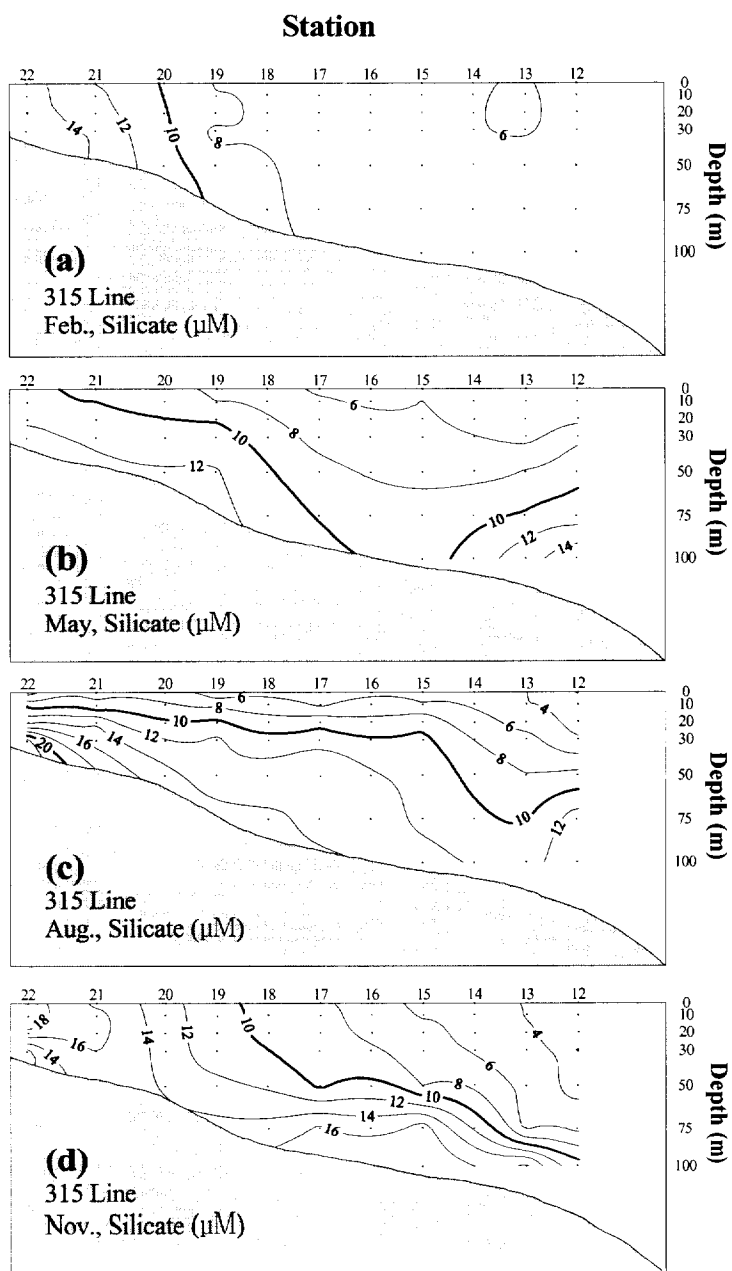


Fig. 3.1.9. Vertical distributions of mean surface silicate (μM) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995 ~ 2003).

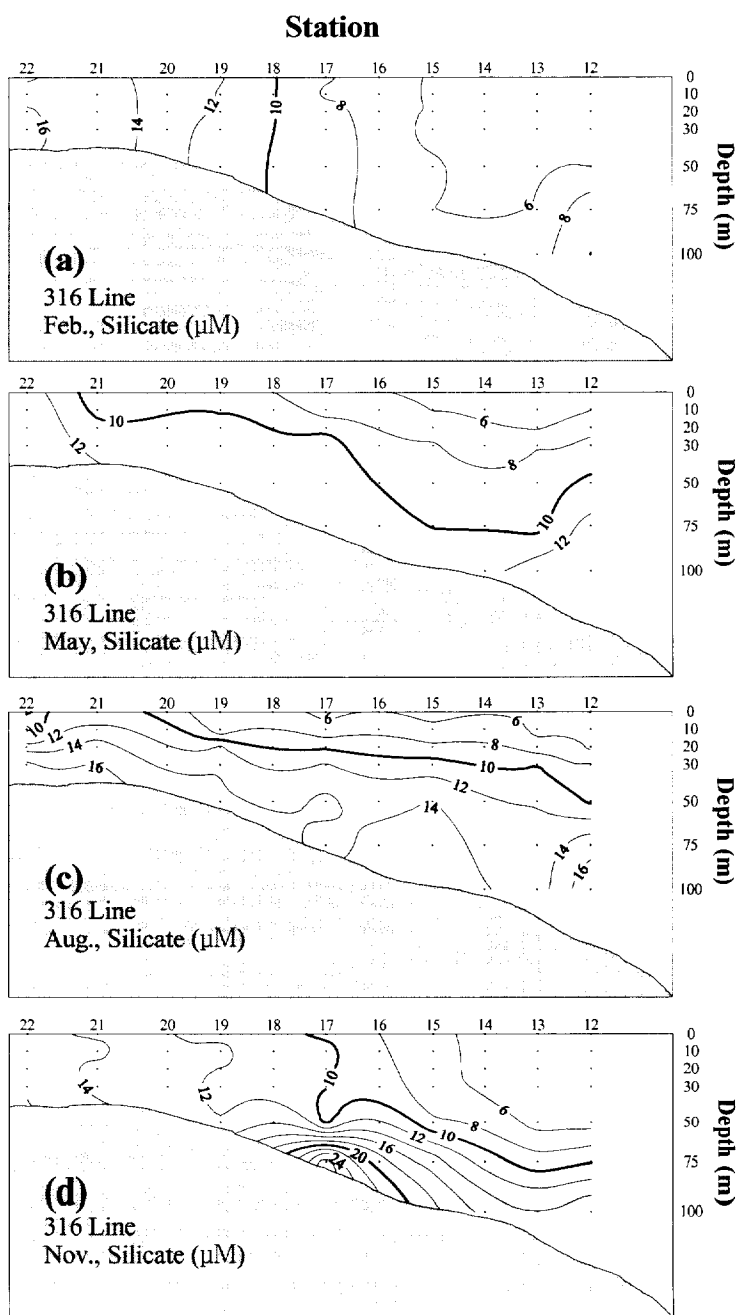


Fig. 3.1.9. Continued, except for 316 line.

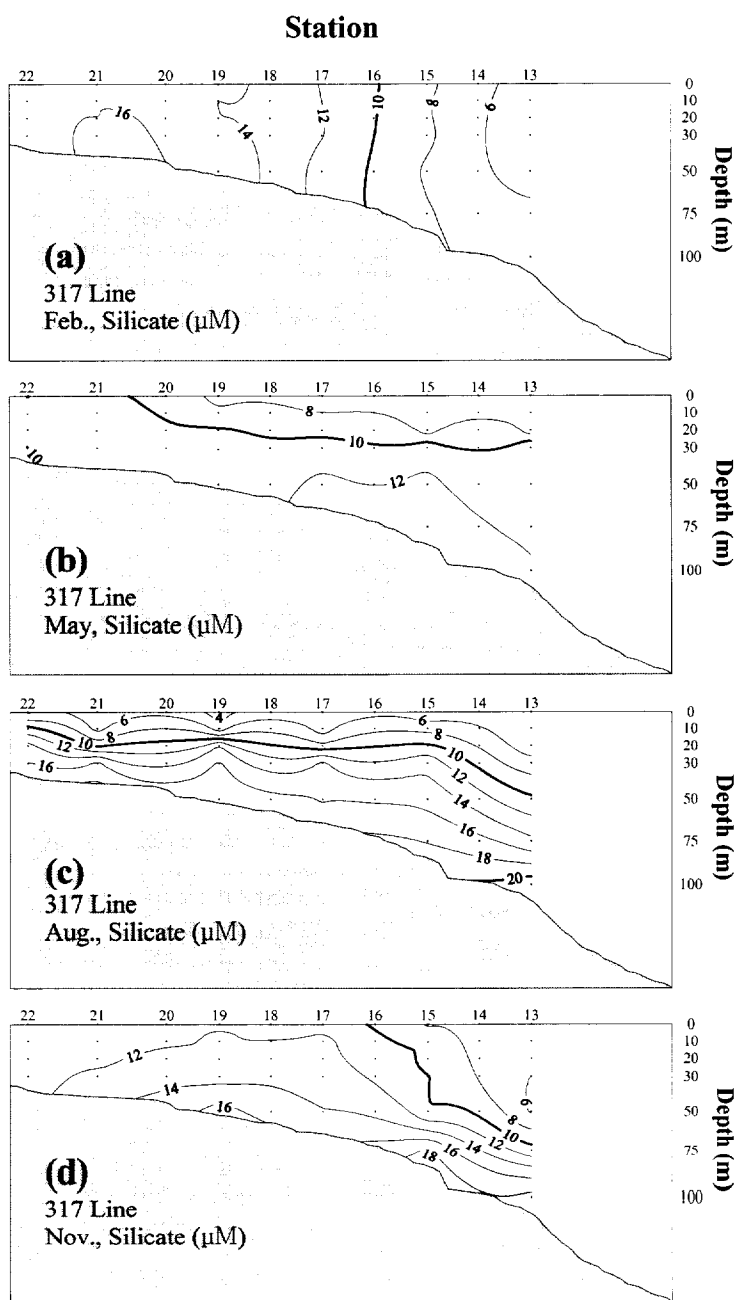


Fig. 3.1.9. Continued, except for 317 line.

갈수록 저농도를 보였고, 수심이 얇은 서쪽은 오히려 315 Line의 저층이 고농도를 나타내었다 (Fig. 3.1.9 (c)). 추계의 경우 표층에서부터 서서히 연직혼합층이 깊어지기 시작하고, 316 Line의 정점 16~18 저층에서는 20 μM 이상의 고농도 값을 보였다 (Fig. 3.1.9 (d)). 정점 15 이동 해역의 50 m 이심에서는 약 12 μM 을 중심으로 강한 약층이 존재하였다.

인산염의 계절별 표면 수평 분포를 Fig. 3.1.10에 나타내었다. 동계에는 0.4~0.8 μM 범위이고, C해역 (0.7~0.8 μM)이 E와 W해역(0.4~0.7 μM)보다 상대적으로 약간 높은 농도를 보였다 (Fig. 3.1.10 (a)). 춘계에는 0.1~0.6 μM 범위로 동계보다 낮은 농도를 보이고, 위도 32°N 이남의 W해역과 E해역에서 상대적으로 높은 농도를 나타내었다 (Fig. 3.1.10 (b)). 하계의 인산염 농도는 전해역이 0.4 μM 이하의 저농도로 고른 분포를 보였다 (Fig. 3.1.10 (c)). 추계에는 0.2~0.7 μM 범위로 하계보다 높은 농도를 보이고, 남서쪽(0.7 μM)에서 북동쪽(0.2 μM)으로 갈수록 낮은 농도 분포를 나타내었다 (Fig. 3.1.10 (d)).

계절별 인산염의 연직 분포를 Fig. 3.1.11에 나타내었다. 동계에는 표층에서 저층까지 거의 균일한 분포를 보이나 정점 18 이서 해역은 317 Line을 제외하고 저층에서 0.8 μM 이상의 고농도가 나타났다 (Fig. 3.1.11 (a)). 춘계에는 0.5 μM 농도를 중심으로 보면, 315 Line에서 317 Line으로 갈수록 동서로 점차 얇은 층에 형성되고, 317 Line 정점 14~16의 저층에서 고농도(1.0 μM 이상)의 존재로 인해 동서간의 층이 분리되어 나타났다 (Fig. 3.1.11 (b)). 하계의 경우 317 Line을 제외하고 2개 Line은 수심 30 m 이천에 동서로 약한 성층이

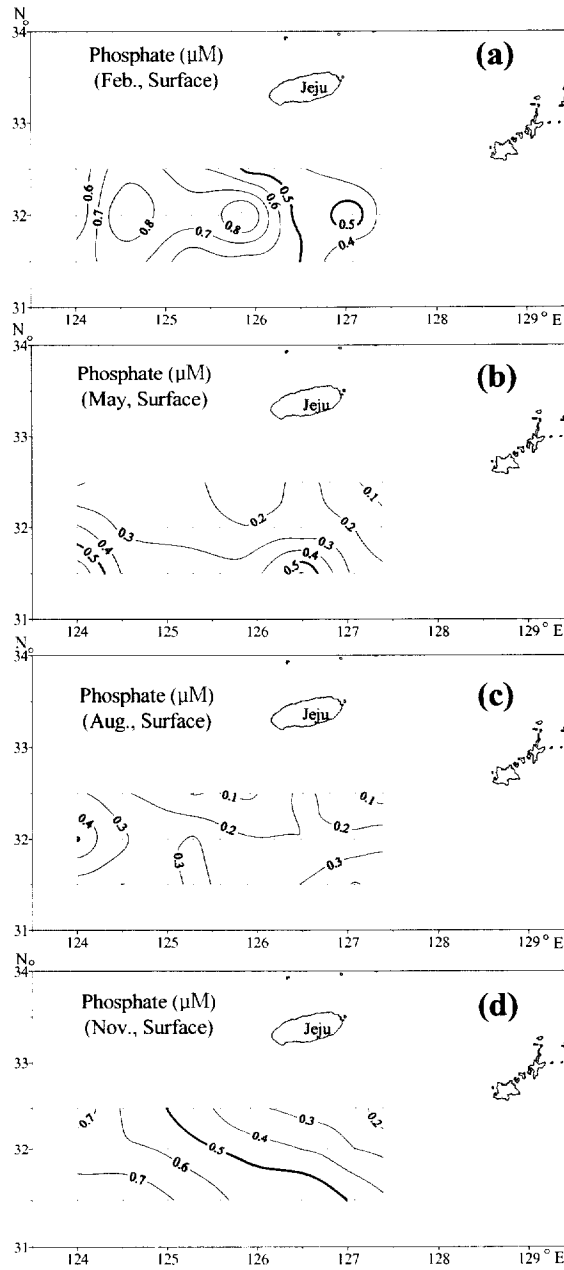


Fig. 3.1.10. Horizontal distributions of mean surface phosphate (μM) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995~2003).

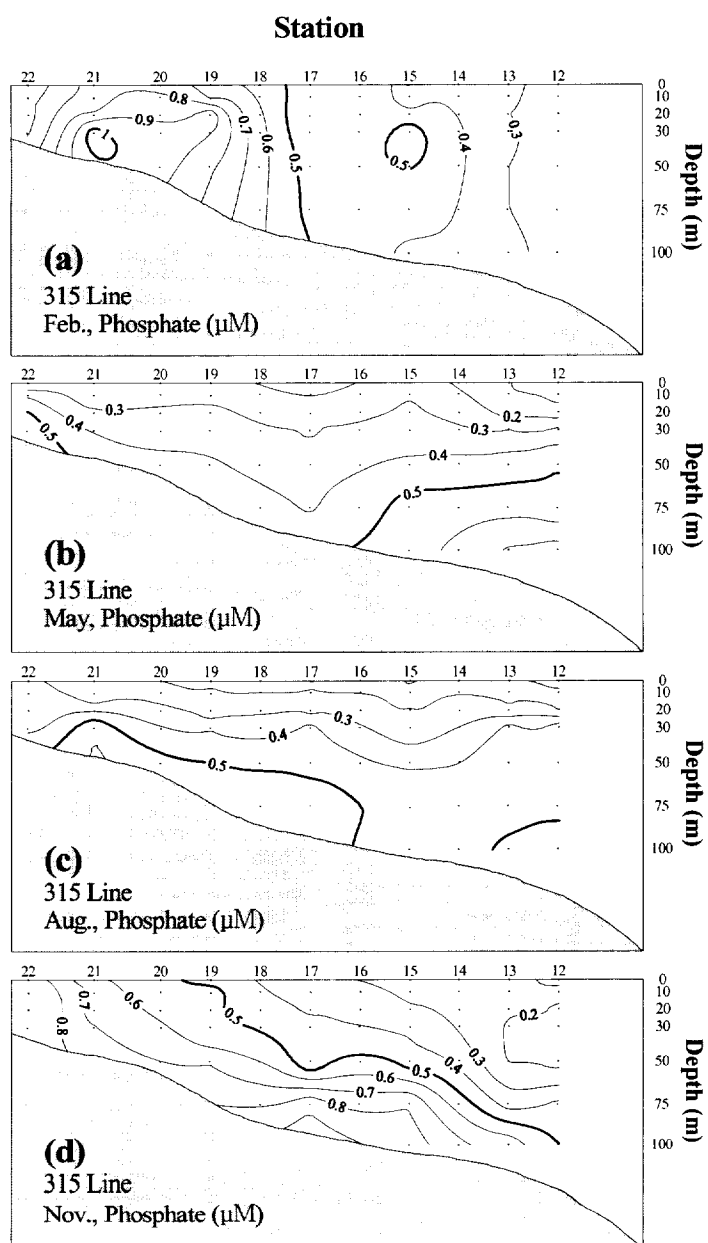


Fig. 3.1.11. Vertical distributions of mean surface phosphate (μM) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 9 years (1995~2003).

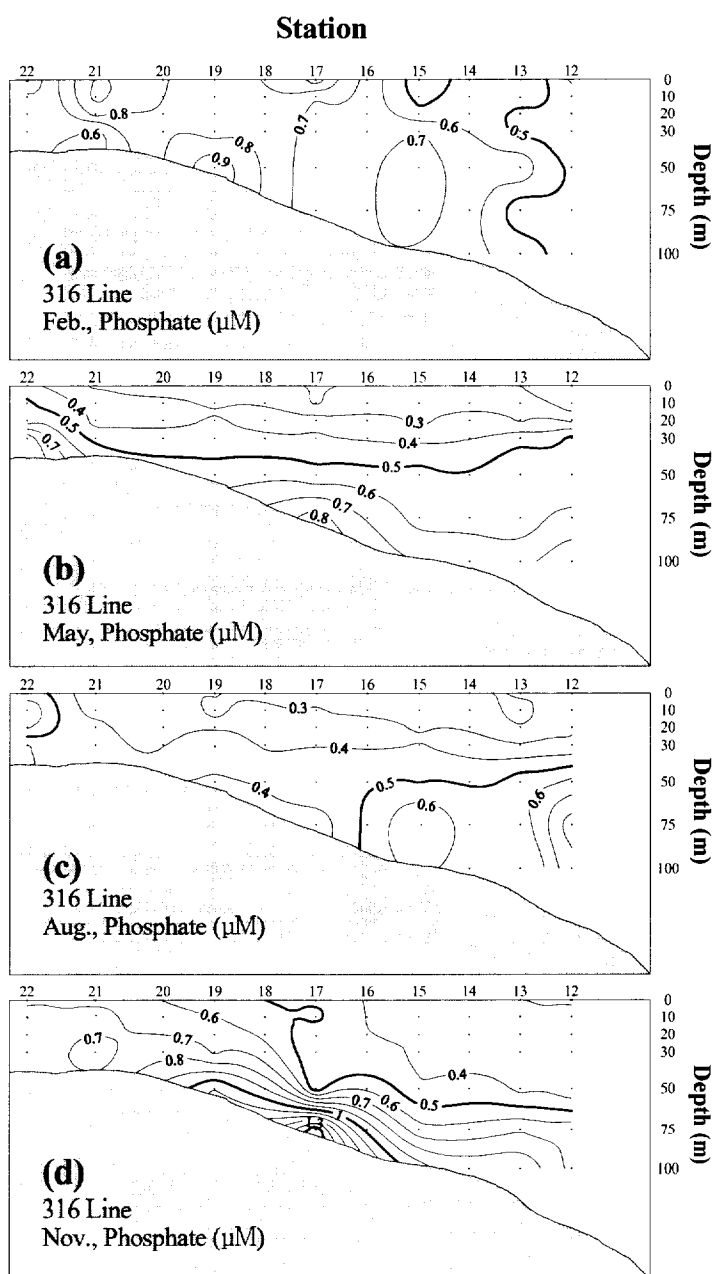


Fig. 3.1.11. Continued, except for 316 line.

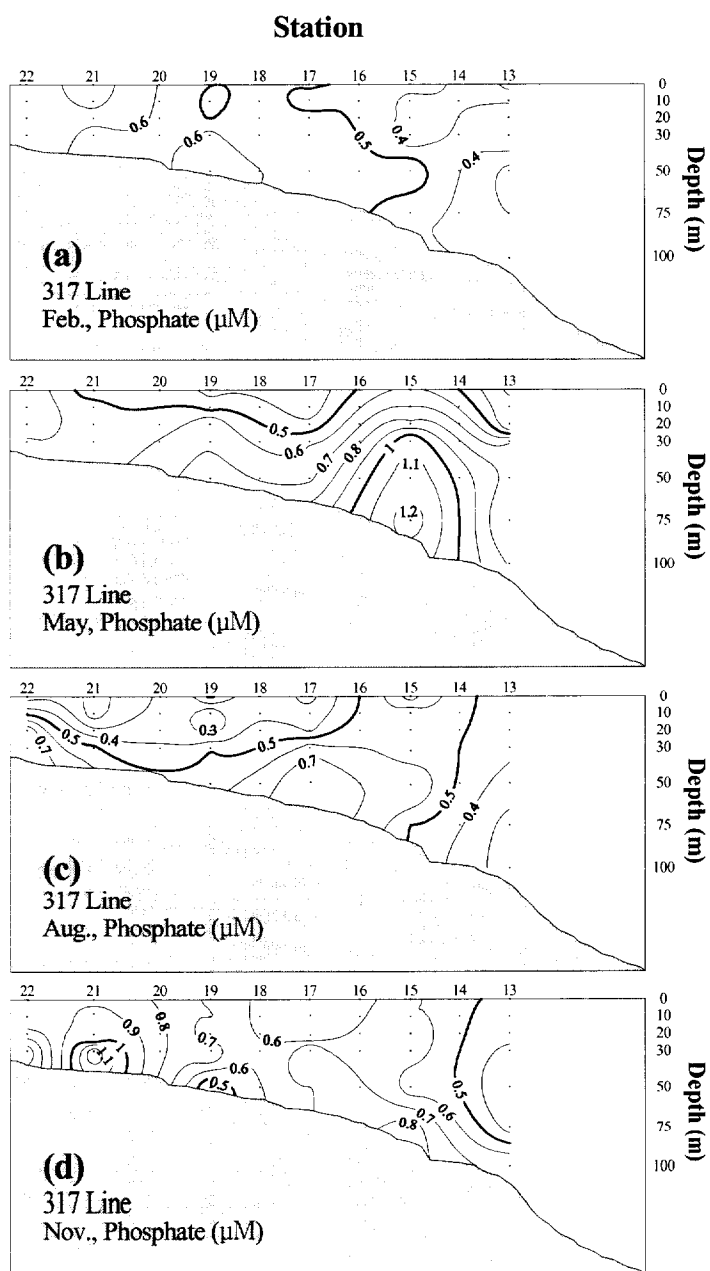


Fig. 3.1.11. Continued, except for 317 line.

형성되고, 정점 16을 경계로 0.5 μM 이상의 고농도가 315 Line은 서쪽에 316 Line은 동쪽에 존재하였다 (Fig. 3.1.11 (c)). 한편 317 Line은 거의 0.5 μM 이하 농도가 지배적이고, 정점 16~17 및 정점 21 이서에서 0.5 μM 이상의 고농도가 나타났다. 추계의 경우 동서간을 연결하는 농도분포가 약해지고 표층부터 연직혼합이 발달하기 시작하였다. 정점 17 이동의 수심 50 m 이심은 대부분 0.5 μM 이상의 고농도가 존재하고 316 Line 저층은 1.0 μM 이상의 고농도가 정점 16~19에 걸쳐 넓게 분포하였다. 또한 317 Line은 국지적으로 정점 21과 정점 15의 저층에서 0.8 μM 이상의 고농도가 나타났다 (Fig. 3.1.11 (d)).

3.1.3. 부유물질 분포

부유물질(suspended solid)은 해수중으로 입사되는 빛의 투과를 방해하여 식물플랑크톤의 성장에 영향을 주며 해색 변화를 일으키는 큰 요인이 되는 요소중의 하나이다. 동중국해에서의 부유물질 분포상태를 파악하기 위해 4년간(2000~2003)의 부유물질 자료를 분석하여 표면 부유물질 수평 분포도를 Fig. 3.1.12에, 연직 부유물질 분포도를 Fig. 3.1.13에 각각 나타내었다. 이들 분포도는 국립수산물학원에서 4개년간 관측한 부유물질 자료를 계절별, 수심별 평균한 값이다. 여기서 서쪽(W)해역은 124.5°E 이서, 중간(C)해역은 124.5°~126.5°E, 동쪽(E)해역은 126.5°E 이동으로 구분하였다.

표면 부유물질의 계절 및 수평 공간 분포를 조사한 결과, 동계의 표면 부유물질은 4~36 mg/L로서 중국 대륙연안수가 남하하는

126°E 이서에서 10 mg/L 이상으로 고농도를 나타냈다 (Fig. 3.1.12 (a)). W해역은 30 mg/L 이상의 높은 값으로, 대마난류역인 E해역 2~4 mg/L에 비해 최대 9배 이상 높은 농도 값을 보였다. 춘계와 하계의 부유물질 농도는 2~5 mg/L로 동계에 비해 매우 낮았고, 동서해역간의 농도차가 거의 없었다 (Fig. 3.1.12 (b), (c)). 추계의 부유물질 농도는 중국 대륙연안수역인 W해역에서 9 mg/L 이상의 값을, 수심이 깊은 E해역에서는 2 mg/L 이하의 값을 보였다. 대륙연안수계와 대마난류수계가 서로 만나서 경계를 이루는 C해역에서는 2~9 mg/L로 동서 해역간 부유물질의 수평 농도 구배가 $0.06 \text{ mgL}^{-1}/\text{km}$ 로 크게 나타났다 (Fig. 3.1.12 (d)).

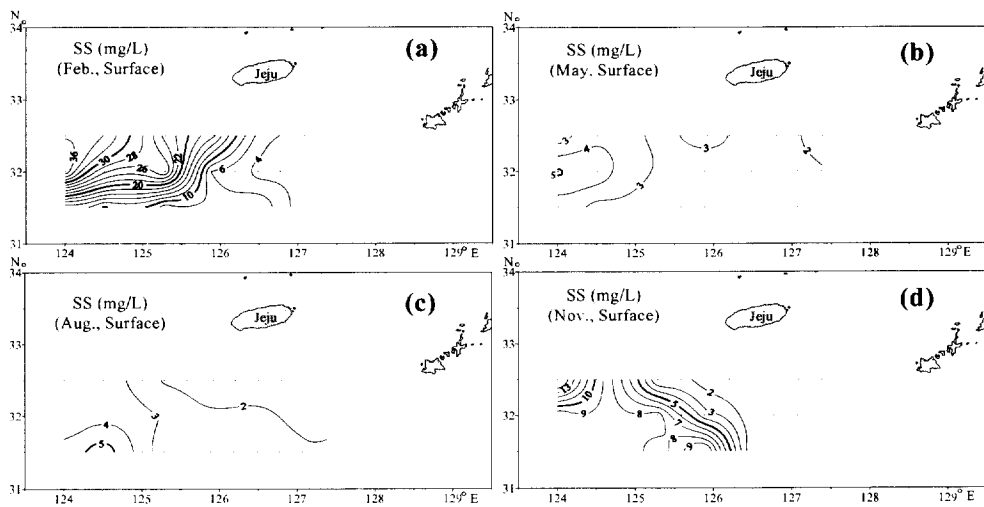


Fig. 3.1.12. Horizontal distributions of mean surface suspended solid (mg/L) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 4 years (2000~2003).

계절별 부유물질의 연직 분포를 Fig. 3.1.13에 나타내었다. 동계에는 317 Line을 제외한 2개 Line에서는 표층에서 저층까지 균일한 농도 분포를 보이거나, 수심이 얇은 정점 21 이서의 저층에서는 30 mg/L 이상의 고농도 값을 나타내었다 (Fig. 3.1.13 (a)). 317 Line의 정점 19 이서 수심 50 m 이하의 얇은 곳에서 강한 부유물질 약층이 형성되어 있다. 수심 30 m 층에서 동서 해역간 부유물질 농도를 비교해 보면 정점 21 이서 연안역은 정점 14 이동 외해역의 4 mg/L 이하에 비해 약 10배 이상 높게 나타났다. 춘계에는 정점 16 이동에서는 저층 부근까지 4 mg/L 이하로 거의 균일한 부유물질 농도 값을 보인 반면 정점 19 이서의 수심이 얇은 곳에서는 수심별 농도 값의 변화가 4~10 mg/L로 크게 나타났다 (Fig. 3.1.13 (b)). 315 Line 정점 19~22, 316 Line 정점 16~22 및 317 Line 정점 18~20의 저층에는 9 mg/L 이상의 고농도 분포를 나타내었다. 하계의 부유물질 농도는 각 Line 별 수심의 차이는 있지만 정점 16 이동에서 2~3 mg/L로 표층에서 저층부근까지 균일한 값을 보이고, 수심이 얇은 정점 18 이서에서는 저층의 10 mg/L 이상의 고농도와 함께 표·저층간에 강한 약층이 형성되었다. 특히 316 Line의 저층 농도는 20 mg/L 이상으로 다른 두 Line의 저층 농도보다 2배 이상 높았다 (Fig. 3.1.13 (c)). 추계(11월)에는 정점 15 이동의 수심이 깊은 해역은 약 2 mg/L 전후로 전수심에서 거의 균일한 농도였으나, 수심이 얇은 정점 20 이서는 표층부근에 약 10 mg/L, 저층에서는 20~30 mg/L 이상으로 표저층간 농도차가 크게 나타났다 (Fig. 3.1.13 (d)). 또한 316 Line의 정점 17의 저층부근에서는 50 mg/L 이상으로 표층 4 mg/L에 비해 12배 이상 높았다.

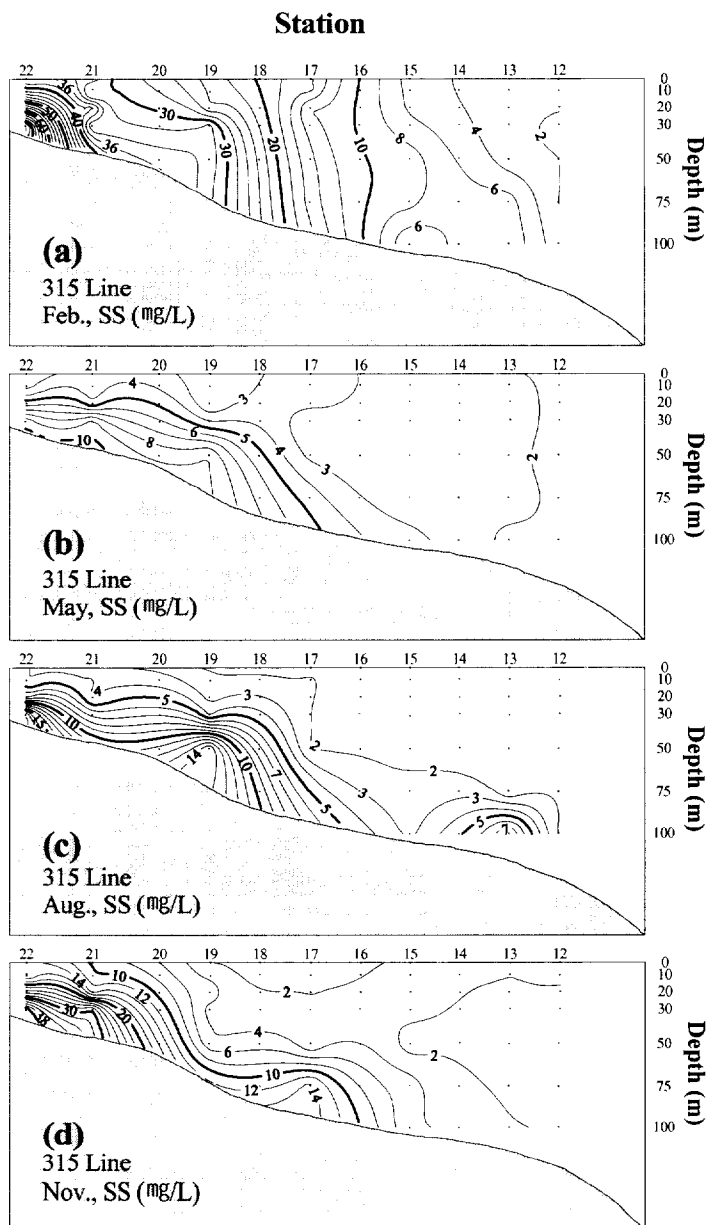


Fig. 3.1.13. Vertical distributions of mean suspended solid (mg/L) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 4years (2000~2003).

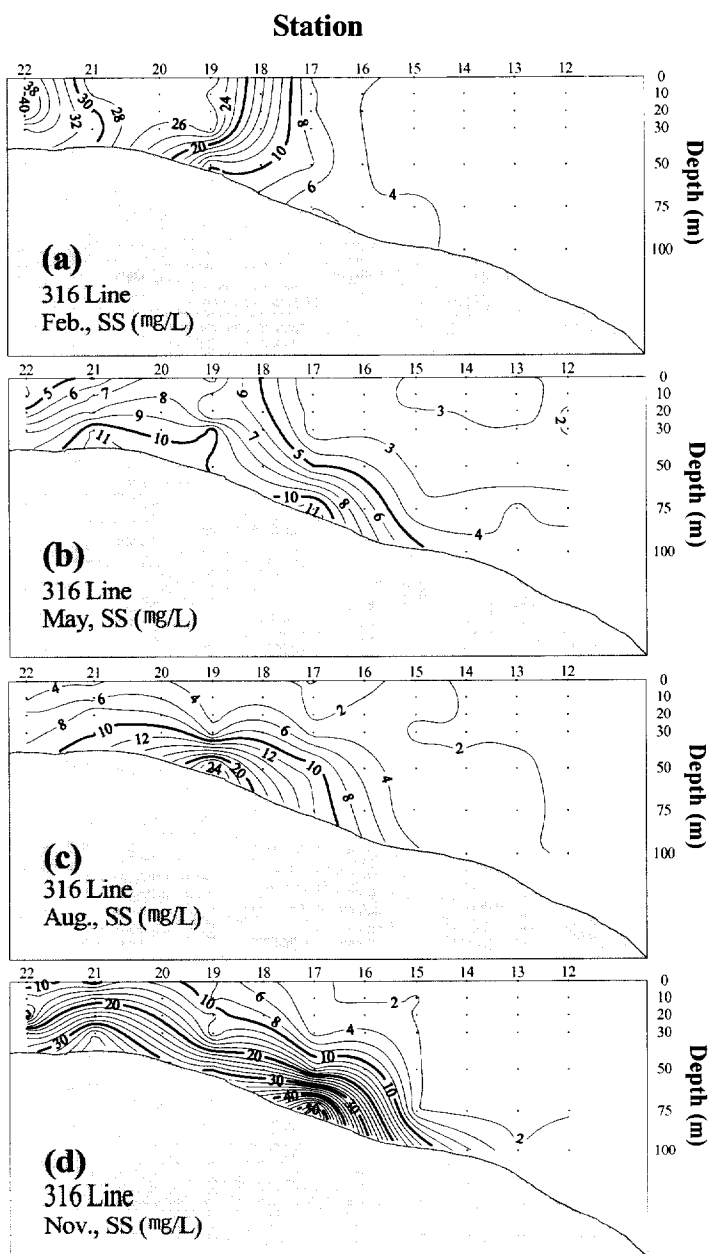


Fig. 3.1.13. Continued, except for 316 line.

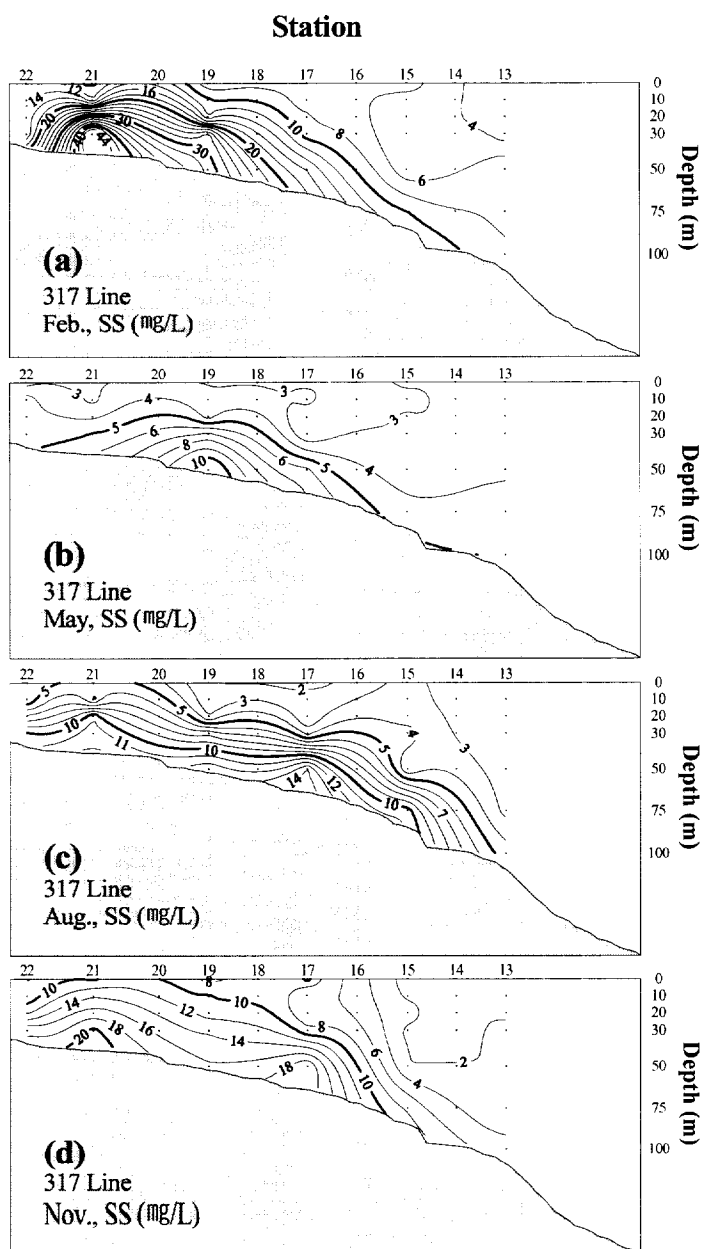


Fig. 3.1.13. Continued, except for 317 line.

3.1.4. 용존산소 분포

동중국해에서의 표면 용존산소 수평분포도를 Fig. 3.1.14에, 연직 분포도를 Fig. 3.1.15에 각각 나타내었다. 이들 분포도는 국립수산물 학원에서 9개년간(2000~2003) 관측한 산소 자료를 계절별, 수심별 평균한 값이다. 여기서 서쪽(W)해역은 124.5°E 이서, 중간(C)해역은 $124.5^{\circ}\sim 126.5^{\circ}\text{E}$, 동쪽(E)해역은 126.5°E 이동으로 구분하였다.

용존산소의 계절별 표면 수평 분포 양상을 보면, 동계와 춘계는 약 $5.5\sim 6.5\text{ ml/L}$ 범위로 서고동저의 분포를 나타내었다 (Fig. 3.1.14 (a), (b)). 하계는 $4.6\sim 5.2\text{ ml/L}$ 범위로 동계와 춘계의 서고동저형 분포가 거의 없어지고, 위도대에 띠모양의 동서분포 형태로 남부가 북부해역보다 약간 높은 경향을 보였다 (Fig. 3.1.14 (c)). 추계에는 $5.0\sim 5.6\text{ ml/L}$ 범위로 전해역에서 균일한 분포로 W해역은 E해역보다 상대적으로 낮은 고농도를 보였다 (Fig. 3.1.14 (d)).

계절별 용존산소의 연직분포를 보면 (Fig. 3.1.15), 동계에는 표면에서 저층까지 균일하고, 수심이 얇은 W해역이 수심이 깊은 E해역보다 다소 높은 농도를 보였다 (Fig. 3.1.15 (a)). 춘계에는 표저층간의 균일한 분포가 거의 사라져 정점 15 이동 해역의 저층에서는 5.0 ml/L 이하로 낮고, 315 및 316 Line 정점 16 이서해역의 30 m 이천에서는 6.0 ml/L 이상으로 높게 나타났다 (Fig. 3.1.15 (b)). 하계에는 $2\sim 5\text{ ml/L}$ 범위로, 수심이 얇은 정점 18 이서해역에서는 약 30 m 이천에서 강한 용존산소 약층이 형성되었다. 또한 세 Line의 정점 19 이서해역 저층에서는 3 ml/L 이하의 빈산소 분포가 나타난 것이 특징적이다 (Fig. 3.1.15 (c)). 추계에는 $3\sim 5.4\text{ ml/L}$ 범위로,

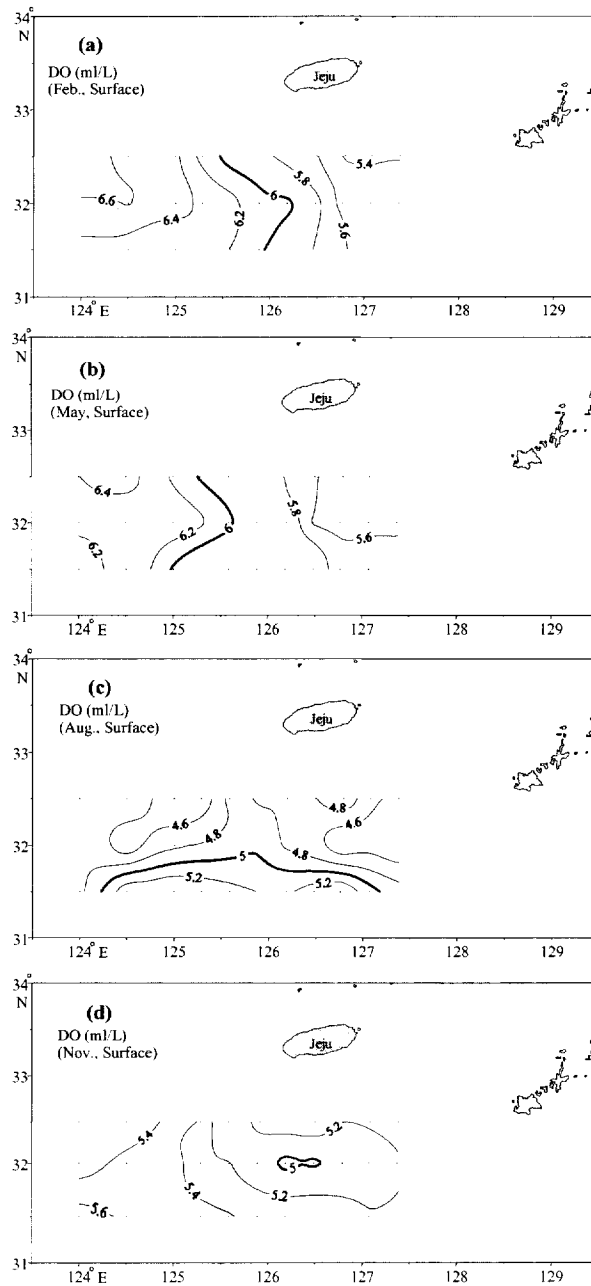


Fig. 3.1.14. Horizontal distributions of mean surface dissolved oxygen (ml/L) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 4 years (2000 ~ 2003).

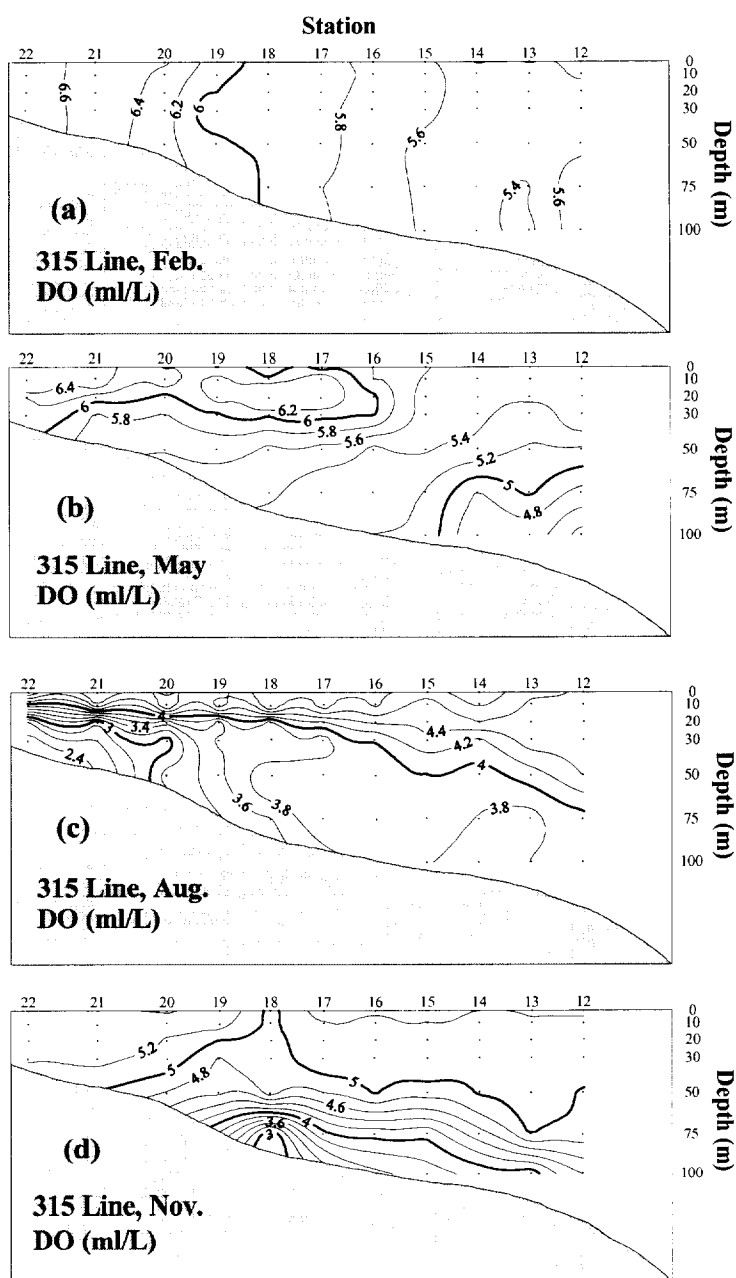


Fig. 3.1.15. Vertical distributions of mean surface dissolved oxygen (ml/L) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 4 years (2000 ~ 2003).

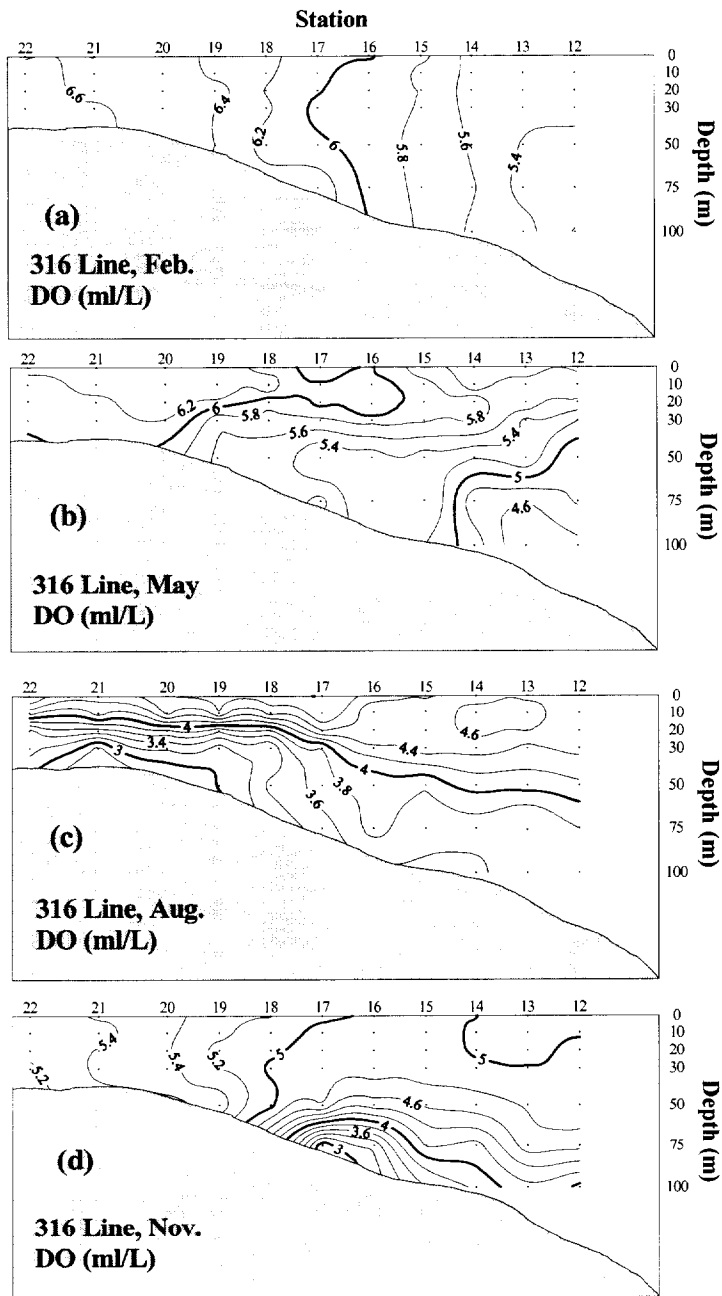


Fig. 3.1.15. Continued, except for 316 line.

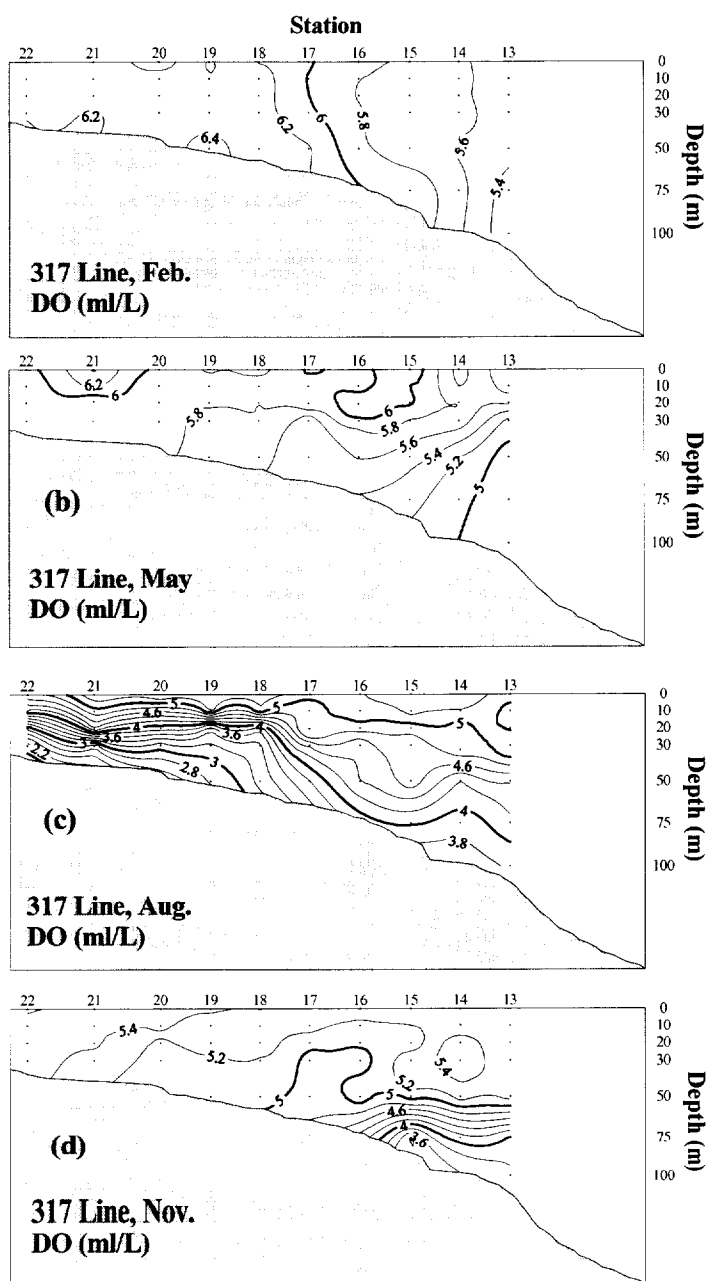


Fig. 3.15. Continued, except for 317 line.

하계 표층부근에 형성된 강한 약층이 사라지고, 수심 50 m 이천에는 거의 균일한 분포 양상을 보였다. 각 Line별 정점간의 차이는 있지만 수심 약 75 m 이심에서 저층의 빈산소 (3.5 ml/L 이하)로 인해 수심 50 m 이심에 강한 용존산소 약층이 형성되었다 (Fig. 3.1.15 (d)).

3.2. chlorophyll *a*의 분포 특성

- 표면분포

동중국해에서의 식물플랑크톤 색소 농도의 분포는 4년 (2000~2003년)간 계절별 (2, 5, 8, 11월) 현장관측 표면 chlorophyll *a* 자료를 분석하여 표면 chlorophyll *a* 수평분포도를 Fig. 3.2.1에 나타내었다.

동계의 표면 chlorophyll *a* 농도 분포는 전해역에서 $0.4 \sim 0.5 \text{ mg/m}^3$ 로 거의 균일한 분포 양상을 나타내었다 (Fig. 3.2.1 (a)). 춘계는 $0.2 \sim 1.4 \text{ mg/m}^3$ 의 분포 범위이고, 약 126.5°E 를 기준으로 서쪽은 0.5 mg/m^3 이하 저농도이고 그 동쪽은 고농도를 나타내었다. 또한 서쪽의 최고 농도 1.4 mg/m^3 에 대한 동쪽의 최저농도 0.3 mg/m^3 의 동서간 농도차는 약 4배 정도로 크게 나타났다 (Fig. 3.2.1 (b)). 하계는 약 125°E 를 중심으로 동쪽은 0.8 mg/m^3 이하의 농도가 남북 방향의 분포를 보이고 그 서쪽은 1.0 mg/m^3 이상의 고농도를 나타내었다. 특히 서북쪽해역(124.5°E 이서, 32°N 이북)에서 1.5 mg/m^3 이상의 높은 chlorophyll *a* 농도 분포를 보였다 (Fig. 3.2.1 (c)). 추계에는 $0.3 \sim 0.4 \text{ mg/m}^3$ 농도범위로 나타나며 동계와 유사하게 전 해역에서 균일한 농도 분포를 보였다 (Fig. 3.2.1 (d)).

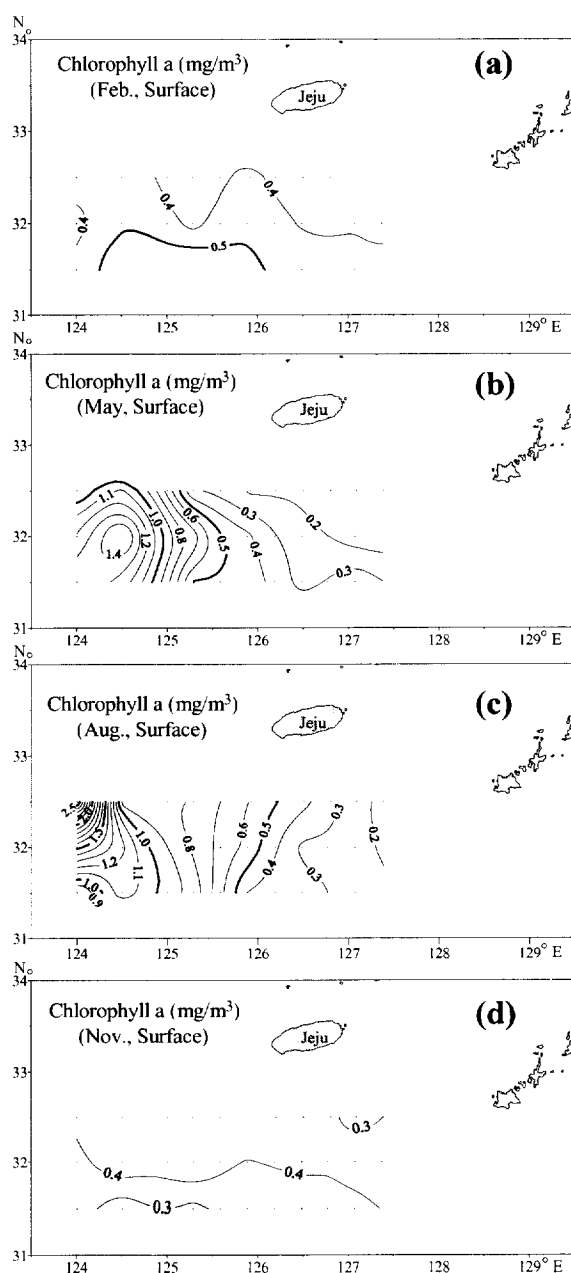


Fig. 3.2.1. Horizontal distributions of mean surface chlorophyll *a* (mg/m³) in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 4 years (2000~2003).

• 연직분포

chlorophyll *a*의 4년간(2000~2003) 평균 연직 농도분포를 Fig. 3.2.2에 나타내었다. 동계의 chlorophyll *a* 농도는 전해역에서 표층에서 저층까지 0.3~0.5 mg/m³로 거의 균일한 농도 분포를 보였으나, 317 Line 정점 17~21의 표층부근에서는 0.5 mg/m³로 저층 0.3 mg/m³에 비해 높았다 (Fig. 3.2.2 (a)).

춘계의 chlorophyll *a* 농도를 보면, 0.5 mg/m³ 이상의 고농도가 316 Line은 정점 17 이서 부근까지 존재하나 그 외 두 Line은 정점 19 이서에 보였고, 그 이동은 0.4 mg/m³ 내외로 수심이 깊을수록 낮은 농도를 나타내었다 (Fig. 3.2.2 (b)). 정점 21 이서 중국대륙 연안역의 표층 부근에서는 1.0 mg/m³ 이상으로 높은 농도 값을 보였으며, 전 수층에서 0.6~1.5 mg/m³ 범위로 대마난류수역(정점 14 이동)의 0.1~0.4 mg/m³ 범위에 비해 약 6배 정도 높게 나타났다. 또한, 317 Line의 경우 수심이 얇은 정점 21 이서는 수심 20 m의 1.0 mg/m³ 농도를 기준으로 표층과 저층에서 공히 1.2 mg/m³ 이상의 고농도를 보였고, 정점 18~21 사이는 표,저층간 균일한 농도 분포가 특징적이다.

하계는 정점 16 이서해역의 30 m 이천에서 0.5 mg/m³의 고농도가 분포하고, 정점 21 이서해역의 표층 부근에서 1.0 mg/m³ 이상으로 가장 높은 농도가 나타났다. 또 정점 15 이동은 약 0.4 mg/m³ 이하의 저농도를 보이며 수심이 깊어짐에 따라 농도가 감소하였다 (Fig. 3.2.2 (c)). 추계는 표층부근에 형성된 하계의 강한 chlorophyll *a* 약층이 사라지고 정점 17 이동 저층의 저농도의 약한 성층을 제외

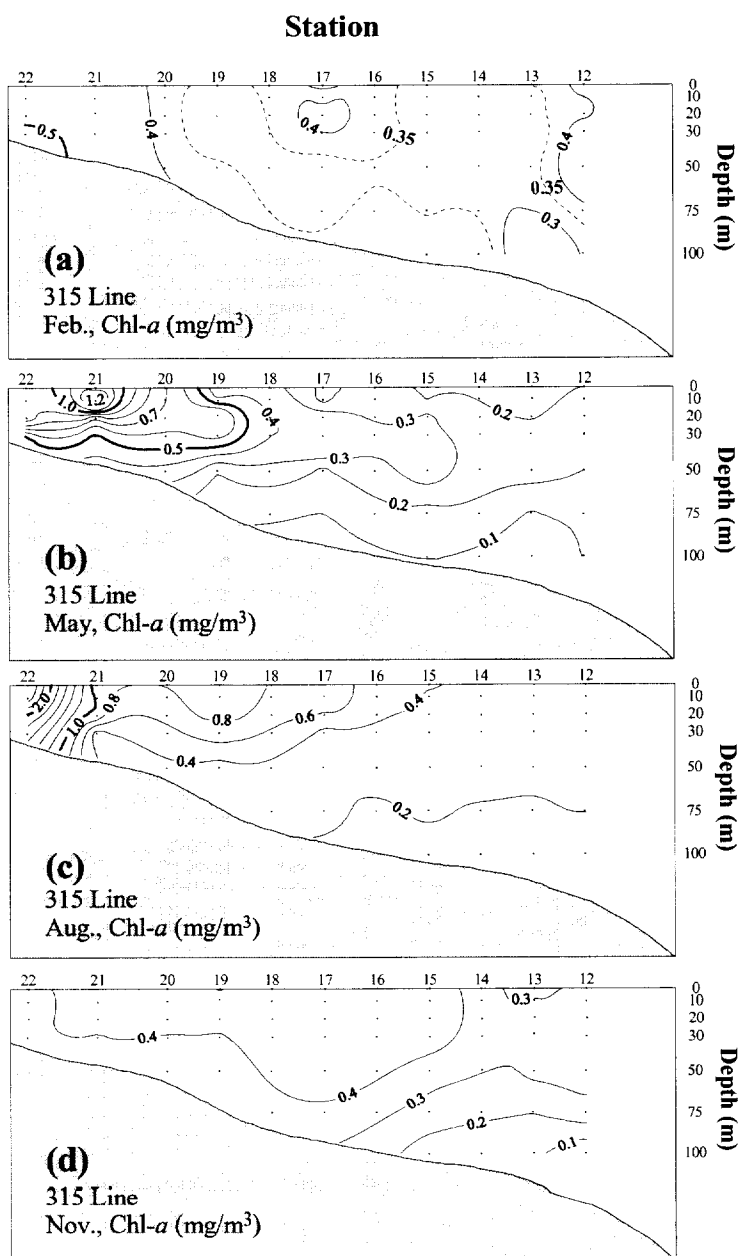


Fig. 3.2.2. Vertical distributions of mean chlorophyll *a* (mg/m^3) at 315 line in February (a), May (b), August (c) and November (d) during 4years (2000~2003).

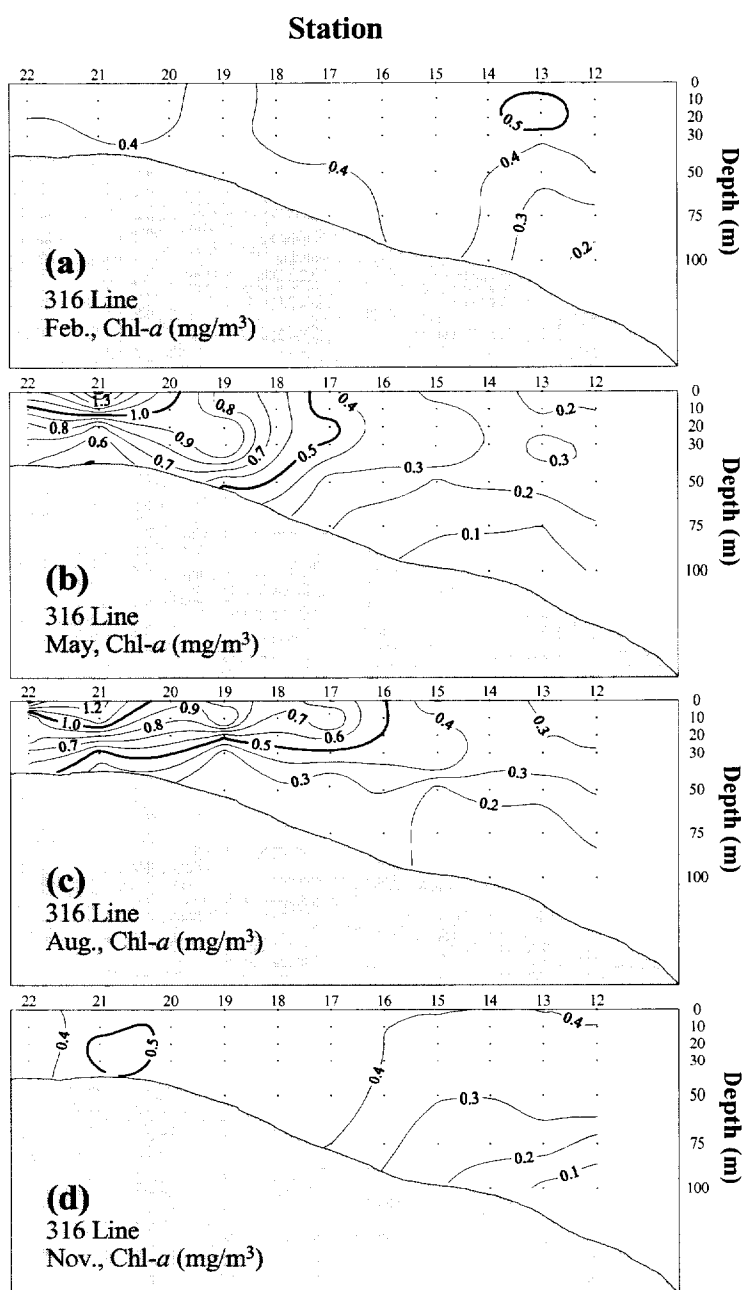


Fig. 3.2.2. Continued, except for 316 line.

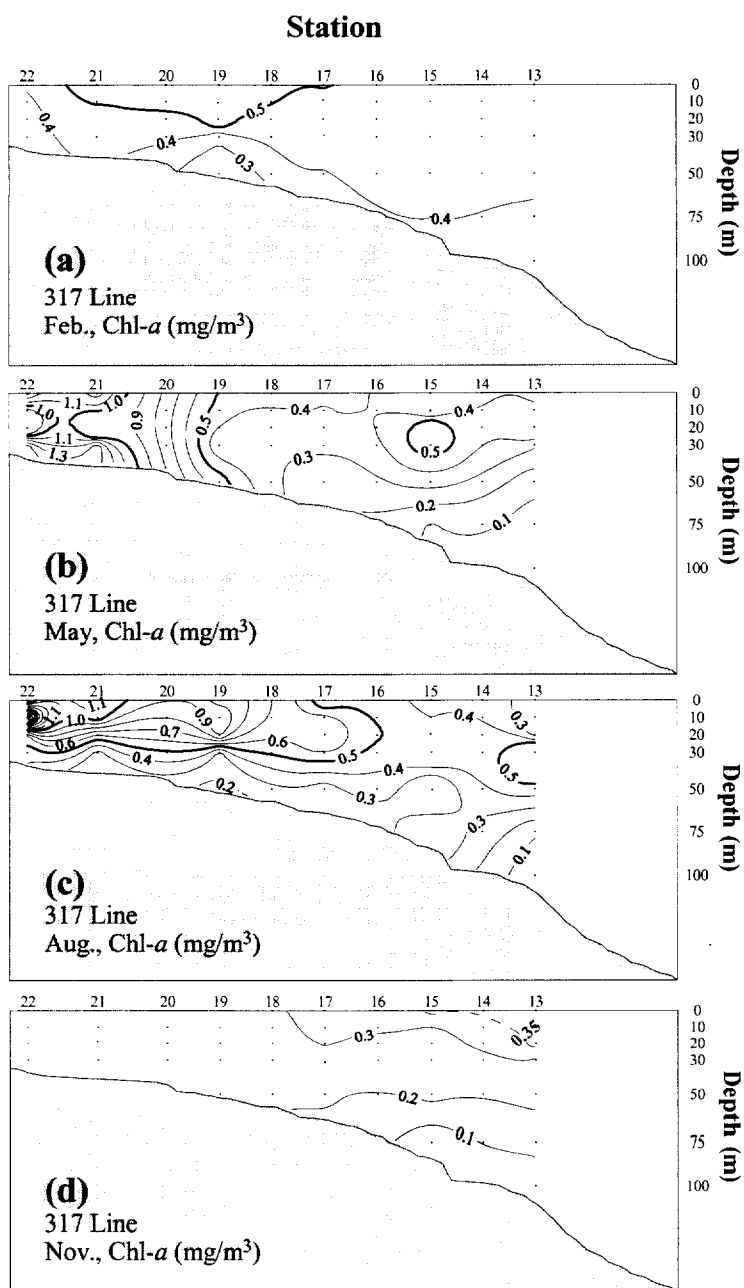


Fig. 3.2.2. Continued, except for 317 line.

하고는 전수심에서 $0.3 \sim 0.4 \text{ mg/m}^3$ 내외로 분포하였다 (Fig. 3.2.2 (d)).

연직 단면도에서 각 Line별 chlorophyll *a* 분포 양상을 살펴보았지만, 보다 상세히 해역별 chlorophyll *a*의 연직분포를 수심이 얇은 서부(W, 정점 22), 중앙부(C, 정점 17), 수심이 깊은 동부 (E, 315 및 316 Line 정점 12, 317Line 정점 13)의 대표 정점을 선택해 계절별 연직 profile을 Fig. 3.2.3에 나타내었다.

해역별 연직 profile에서 수심이 얇은 각 Line의 W해역(정점 22)은 하계에 표층부근($0 \sim 10\text{m}$)에서 chlorophyll *a* 농도가 최대이고 315 Line에서 2.5 mg/m^3 이상의 높은 농도를 나타내었다. 이와 같은 하계 고농도 chlorophyll *a* 값은 양자강 유출수에 의한 영양염 공급 등과 관계있을 것으로 생각된다. C 해역(정점 17)의 경우 chlorophyll *a*의 농도 최대층은 춘계에는 수심 $20 \sim 30 \text{ m}$ 층에서 0.5 mg/m^3 내외로, 하계에는 수심 $10 \sim 20 \text{ m}$ 층에서 약 1.0 mg/m^3 로 최대를 보였고, 표면과 저층에서는 0.3 mg/m^3 이하의 농도를 나타내었다. E해역에서는 계절별 chlorophyll *a* 농도 차가 매우 작게 나타났고 317 Line을 제외하고는 수심별로도 큰 차이를 보이지 않았다. 춘계에는 $20 \sim 30 \text{ m}$ 층에서 약 0.5 mg/m^3 내외로 최대층이 나타나고, 태양고도가 높아져 저층에까지 빛이 투과되는 하계의 경우 315, 316 Line 50 m 층에서 0.4 mg/m^3 로 최대가 되며, 315 Line에서는 30 m 층에서 약 0.7 mg/m^3 로 최대를 나타내었다.

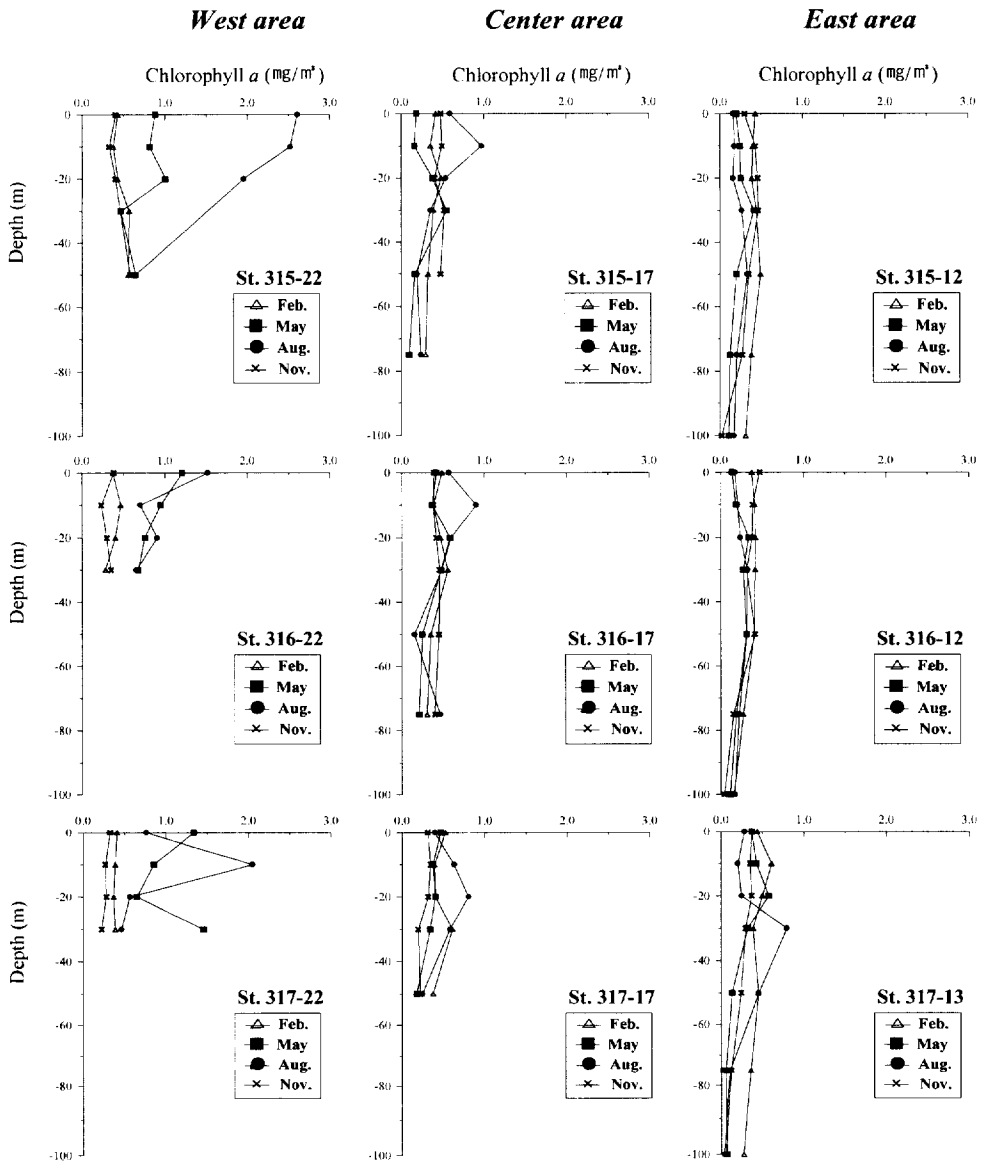


Fig. 3.2.3. Seasonal profiles of chlorophyll *a* (mg/m³) at west area, center area and east area during 4 years (2000~2003).

3.3. 식물플랑크톤 색소의 해수광 특성

해양에서 식물플랑크톤 현존량의 지표로 이용되는 chlorophyll *a*와 해수 흡광계수와와의 관계를 살펴보았다. 해수 흡광계수는 *Trper and Yentsch* (1967)의 방법에 의해 계산된 것이다.

식물플랑크톤에 의한 흡광계수(a_{ph})는 계절별, 정점별로 차이가 있으나 chlorophyll *a* 흡수 밴드역인 440nm 부근에서 최대를 보인다 (Fig. 3.3.1). 스펙트럼의 분포를 보면 430~450 nm 파장에서 상대적으로 높게 나타났고, 600nm 부근 파장대에서 낮은 흡광분포를 보였다. 따라서 chlorophyll *a*의 최대 흡수를 나타낸 440nm 파장에서 식물플랑크톤에 의한 흡광계수와 chlorophyll *a*간의 관계성을 계절별로 상세히 파악해 보았다.

전체 조사기간 (2000~2002년)동안 식물플랑크톤에 의한 흡광계수 $a_{ph}(440)$ 와 chlorophyll *a*에 대한 502개 자료를 이용하여 분석한 결과 95% 신뢰구간에서 상관계수는 0.64로 나타났다 (Fig. 3.3.2). 여기서 chlorophyll *a* 값이 9~11 mg/m³의 2개 자료는 2002년 8월에 315 Line 정점 21과 22에서 관측된 결과 값이다. 계절별로 볼 때 a_{ph} 와 chlorophyll *a*간에는 춘계인 5월 ($r=0.87$)과 하계 8월 ($r=0.7$)에 관련성이 높고, 추계 (11월)와 동계(2월)에는 상관계수가 각각 0.37, 0.23으로 비교적 낮게 나타났다.

식물플랑크톤의 단위 chlorophyll *a* 당 흡광계수 즉, 비흡광계수 (specific absorption coefficients) a_{ph}^* 와 chlorophyll *a* 농도간의 상관을 보면 125°E 이서(W area)와 126.5°E 이동(E area)을 각각 Case II와 Case I 수, 그 중간 수역(C area)을 125°E ~126.5°E 까지로 구분하여 살펴보았다. 여기서 비

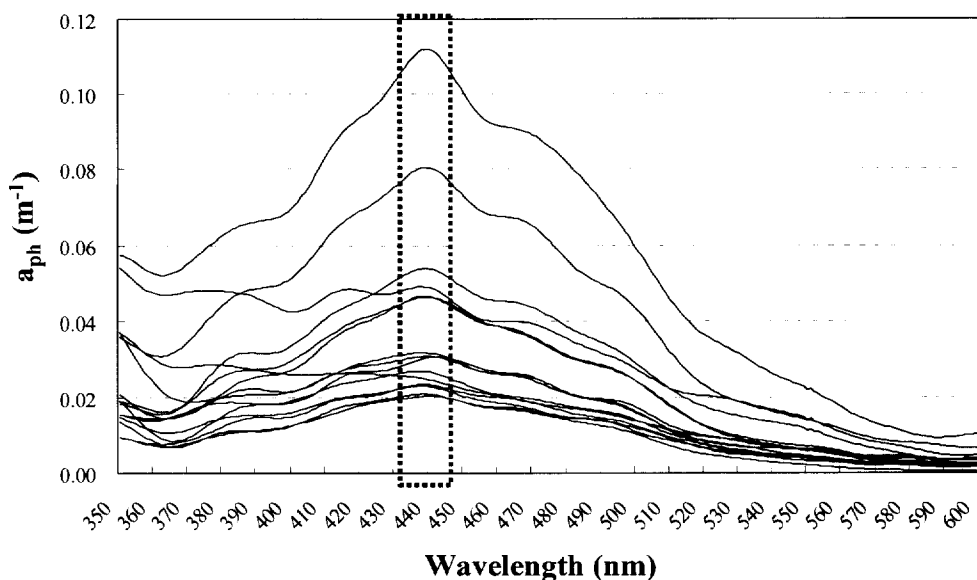


Fig. 3.3.1. Spectrum of absorption coefficient of living phytoplankton (a_{ph}) in the East China Sea in May, 2000.

흡광계수가 높은 것은 단위 chlorophyll a 빛의 이용효율이 높음을 의미한다. 비흡광계수와 chlorophyll a 관계를 분석한 결과, 대마난류수역의 Case I ($r=0.85$)에서 중국대륙 연안수역의 Case II ($r=0.45$)로 갈수록 낮은 상관을 나타내었다 (Fig. 3.3.3).

비흡광계수와 chlorophyll a 농도간 관계식은 맑은 동쪽 해역(Case I)에서는 $a_{ph}^*(440) = 0.0335 \text{ chl-}a^{-0.859}$, 탁한 서쪽 해역(Case II)에서는 $a_{ph}^* = 0.0608 \text{ chl-}a^{-0.446}$ 로 chlorophyll a 농도 변화에 따른 비흡광계수의 크기 변화는 맑은 동쪽 해역에서 탁한 서쪽 해역에 비해 약 2배 정도 크게 나타났다 (Fig. 3.3.4).

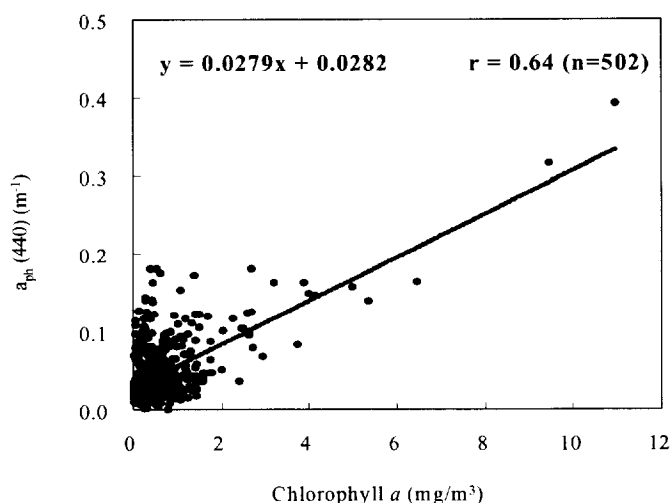


Fig. 3.3.2. Relationship between the absorption coefficient, $a_{ph}(440)$ and chlorophyll a during 3 years (2000 ~ 2002).

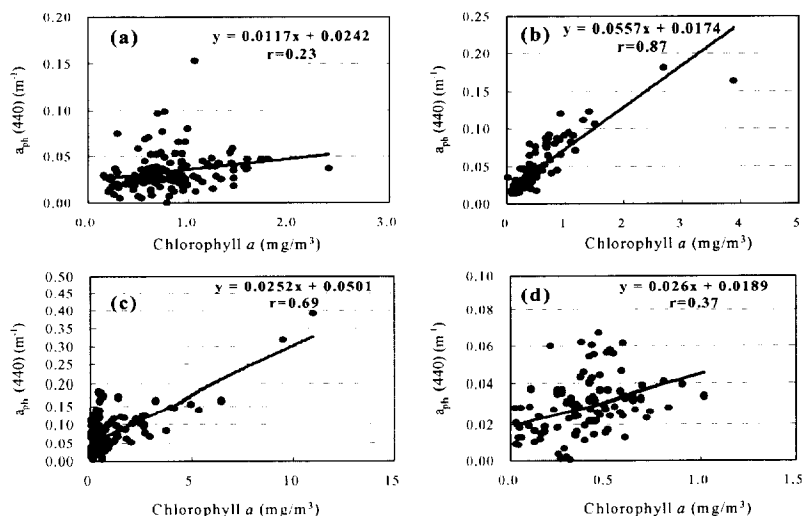


Fig. 3.3.3. Relationship between the absorption coefficient, $a_{ph}(440)$ and chlorophyll a in (a) February, (b) May, (c) August and (d) November during 3 years (2000 ~ 2002).

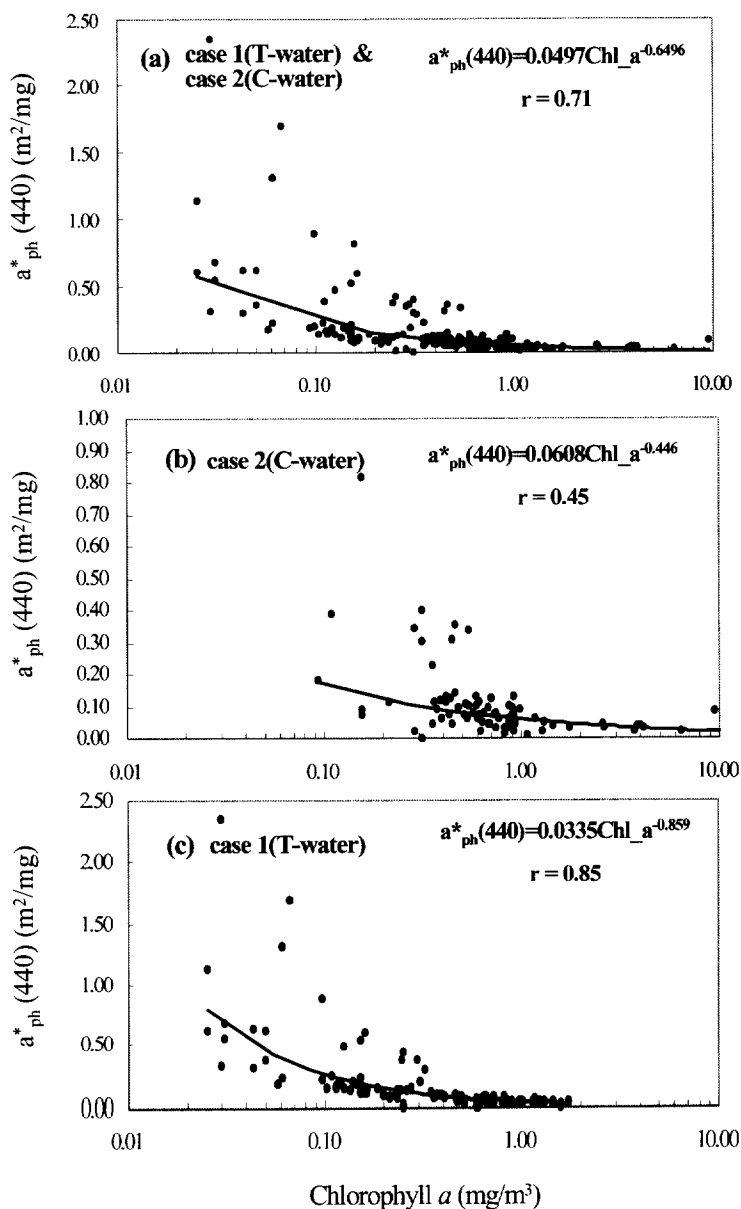


Fig. 3.3.4. Relation between the specific absorption coefficient, $a_{ph}^*(440)$ and chlorophyll a in (a) Case I & II water, (b) Case II water and (c) Case I water.

3.4. 위성탐사 chlorophyll *a* 분포

동중국해는 해양 광학적 특성상 맑은 대마난류수역인 Case I 및 중국대륙연안수역인 Case II 그리고 이들의 혼합해역으로 그 특성이 나뉘는 매우 복잡한 해역의 특성을 지니고 있다. 먼저 동중국해 전체 해역의 chlorophyll *a*의 공간적 분포를 파악하기 위하여 SeaWiFS 해색 위성에서 관측한 2002년 광역의 동중국해 월별 평균 위성 chlorophyll *a* 농도 분포를 Fig. 3.4.1에 나타내었다.

동계(1~3월) chlorophyll *a* 분포는 부유물질 등에 의한 error 값을 제거한 결과, 1~2월은 중국 연안쪽의 연안수 확장은 알 수 없으나 대체로 대륙 연안수역에서 1.5 mg/m³ 내외로 대마난류수역 0.5 mg/m³에 비해 3배 높은 농도 분포를 나타내었다.

춘계(4~6월)에는 대마난류수의 확장으로 동계에 확장된 고농도 (1.0 mg/m³ 이상) 해역이 서쪽으로 약간 축소되었다. 또한 중국 대륙 연안수역의 영향을 받은 126°E 이서는 2~5 mg/m³로 고농도가 분포하고, 126°E 이동의 대마난류역은 0.5 mg/m³ 이하의 저농도를 보였다.

하계(7~9월)에는 중국 대륙에서 유입되는 양자강 유출수의 영향으로 2 mg/m³ 이상의 고농도 분포가 춘계에 비해 더욱 동쪽으로 확장 분포하고 있으며, 동중국해에서 제주도와 한국 남해안을 잇는 1 mg/m³ 이상의 고농도가 나타났다.

추계(10~12월)의 chlorophyll *a* 농도 분포는 남서-북동 방향을 경계로 126.5°E 이동의 대마난류수역에서는 0.5 mg/m³ 이하로 저농도를, 126.5°E 이서의 대륙연안수역에서는 1.0 mg/m³ 이상으로 하계

에 이어 고농도 분포를 나타내었다.

동중국해에서 위성자료를 이용하여 전해역의 공간적인 분포를 보았지만 보다 정도 높은 chlorophyll *a* 농도 추정을 위해 위성과 동시 관측된 현장 관측 자료간의 관계성 정립이 필요하다.

따라서 동중국해 광역의 chlorophyll *a*의 분포를 해수색 위성인 SeaWiFS 위성자료와 같은 시기에 현장에서 관측된 chlorophyll *a* 농도와 비교 분석하여 새로운 알고리즘식을 도출하였다. 위성과 현장관측 chlorophyll *a* 상호관계식 도출을 위해 동중국해와 남해 근해역에서 1999년 (10월, 12월)과 2000~2003년 (2, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12월)에 관측한 현장 및 SeaWiFS 위성 280개의 자료로부터 새로운 chlorophyll *a* 관계식 $y = 0.168 \exp^{0.621x}$ 을 추출하였으며, 위성과 현장 chlorophyll *a*와의 상관계수는 $r=0.83$ 이었다 (Fig. 3.4.2).

전지구적 알고리즘(OC 2)을 적용한 위성 chlorophyll *a*와 위성과 현장관측 자료의 경험적 관계식으로 추정된 chlorophyll *a*를 비교하여, 2002년 11월을 예로 Fig. 3.4.3에 나타내었다. chlorophyll *a*의 보정전 (a)과 보정후 (b) 농도분포를 보면 전체적으로 보정 전에 비해 보정 후에 chlorophyll *a* 농도가 낮게 나타났다. 125~125.5E 해역에서 보정전 SeaWiFS chlorophyll *a* 분포에서는 약 2 mg/m³ 값으로, 0.5 mg/m³ 내외의 현장관측 (c) 값에 비해 매우 높게 나타났으나 보정 후에는 0.6 mg/m³ 내외로 현장 관측 chlorophyll *a*에 근접한 분포를 나타내었다. 그러나 124.5°E 이서 해역에서는 1.0 mg/m³ 내외로 현장 관측 값 (약 0.6 mg/m³)에 비해 다소 높은 농도 분포를 나타내었다.

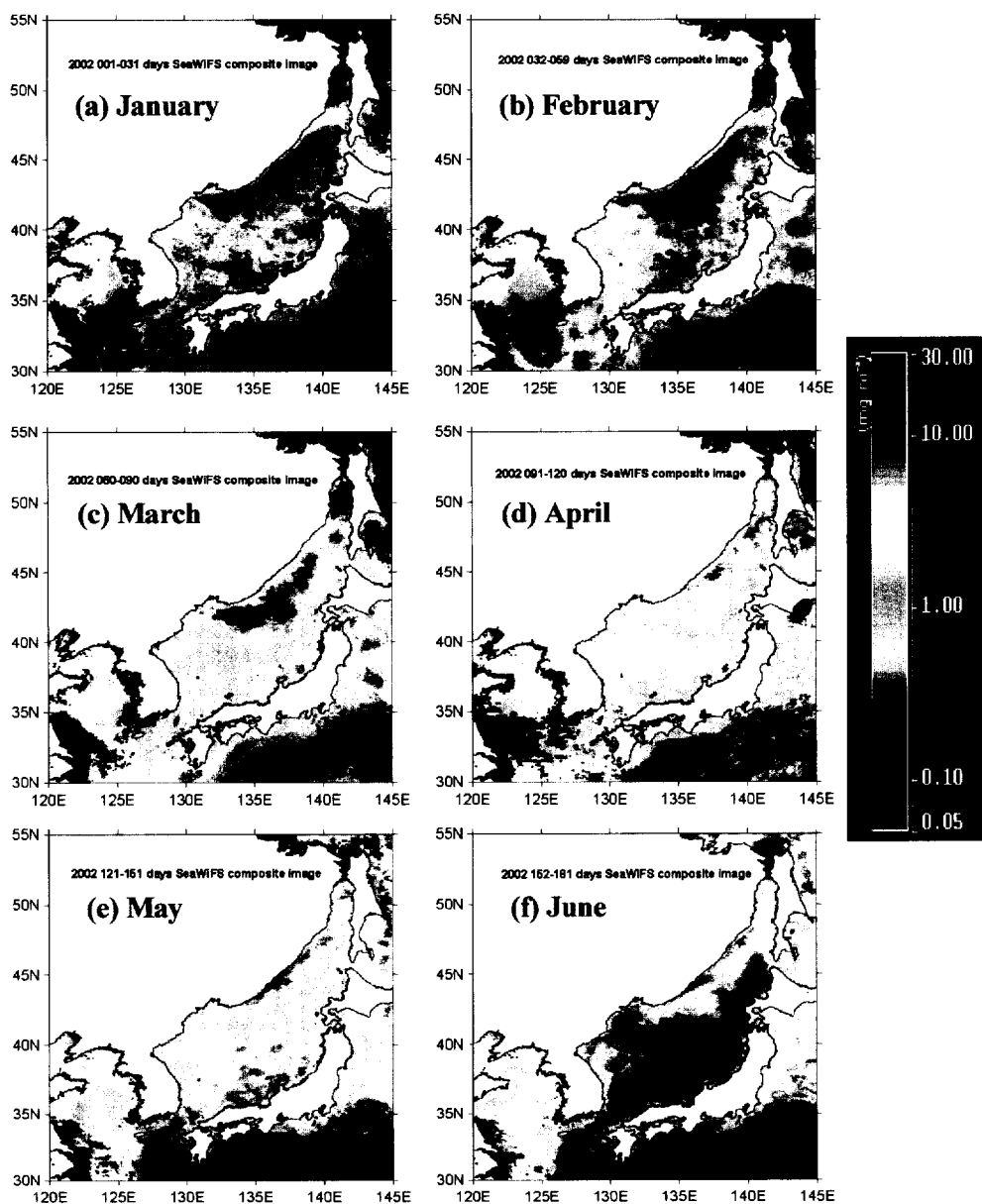


Fig. 3.4.1. Orbview 2/SeaWiFS monthly mean chlorophyll *a* concentration images from January to June 2002 (Data supported by the Goddard Space Flight Center Earth Science Distributed Active Archive Center (GES.DAAC)).

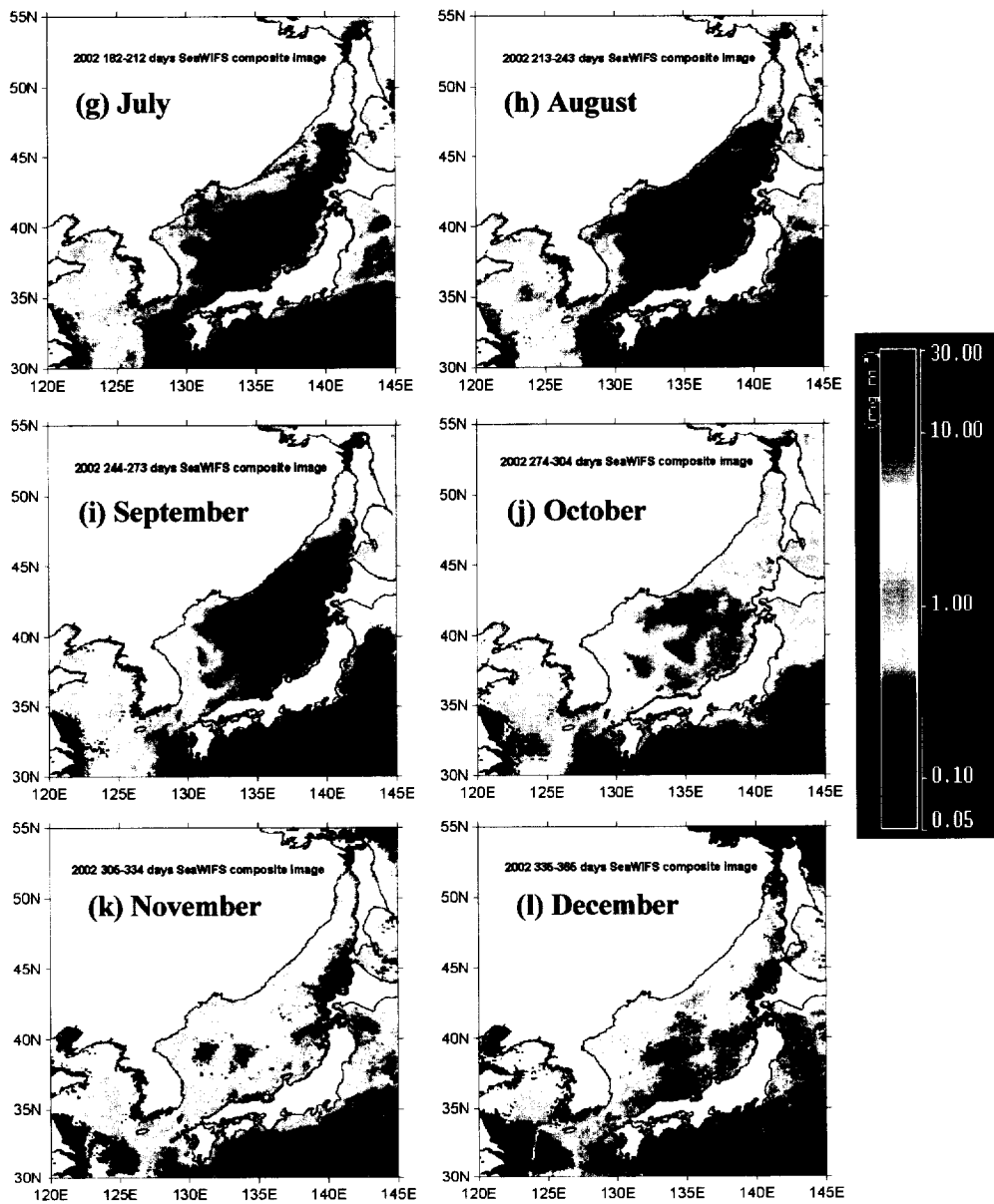


Fig. 3.4.1. Continued.

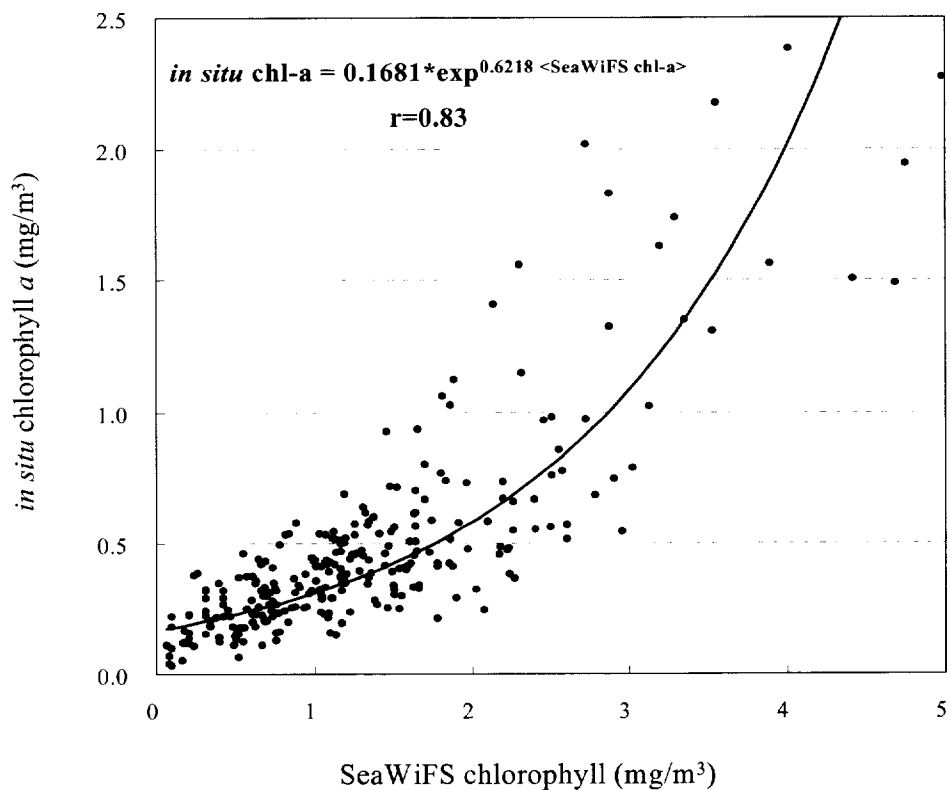


Fig. 3.4.2. Relationship between the *in situ* chlorophyll *a* and the estimated chlorophyll *a* from the processed SeaWiFS imagery using the OC 2 algorithm in the East China Sea.

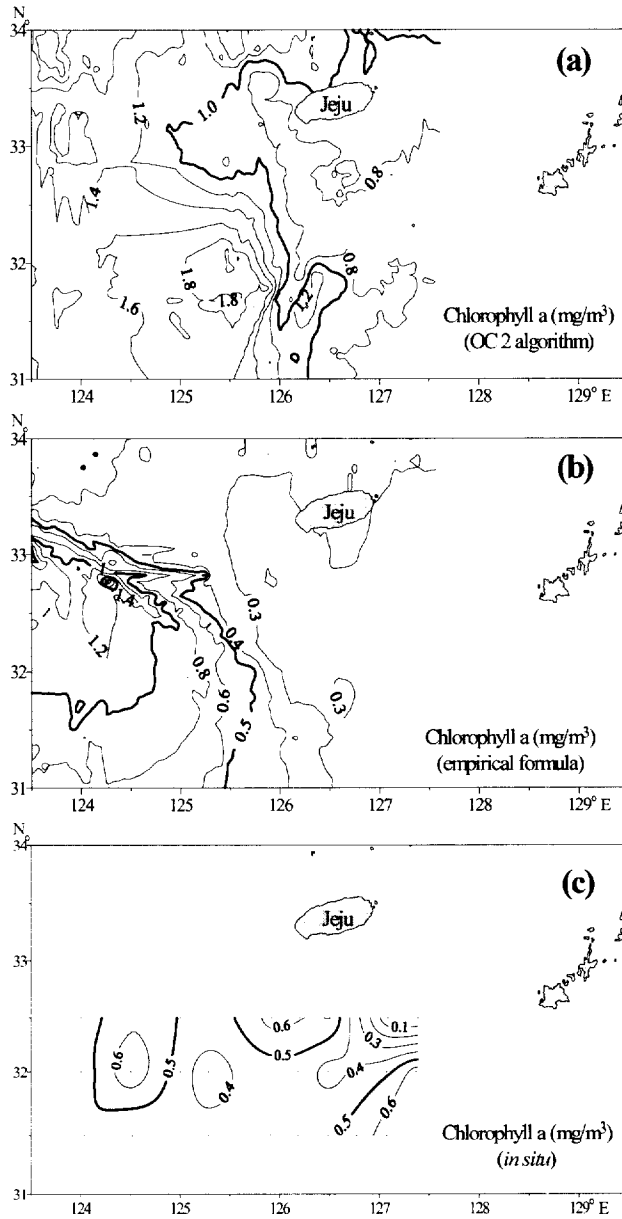


Fig. 3.4.3. Distributions of the chlorophyll *a* from SeaWiFS on 6th Nov., 2002. (a) chlorophyll *a* from SeaWiFS level 2 data using OC 2. (b) chlorophyll *a* from SeaWiFS data using an empirical formula. (c) *in situ* chlorophyll *a* in Nov., 2002.

4. 고 찰

동중국해는 넓은 대륙붕에 존재하는 바다로서 중국대륙 연안수, 한국 남안의 연안수 그리고 쿠로시오 난류수가 만나는 복잡한 해황 특성을 지니는 해역이다. 또한 이 해역은 오징어, 고등어, 꽁치 등의 산란장으로 중요하며 동물플랑크톤을 통해 어류의 생활사에 큰 영향을 미치는 식물플랑크톤의 현존량을 파악하는 것은 저차생물 생산과정 및 그 생산량을 이해하기 위한 기초로서 대단히 중요하다.

본 연구에서는 먼저 식물플랑크톤 현존량의 지표로 이용되는 chlorophyll *a* (Sathyendranath *et al.*, 1989) 변동에 대한 물리 (수온, 염분) 및 생물 화학적(용존산소, 영양염 등) 인자와의 관련성에 대해 고찰하였다. 그 다음 위성 원격탐사에 의한 광역의 정도 높은 chlorophyll *a* 농도 추정 알고리즘 결과에 대해 검토하였다.

4.1. chlorophyll *a*와 해양인자간의 관계

동중국해 chlorophyll *a* 변화 요인을 파악하기 위하여 chlorophyll *a*와 각 해양인자간의 관계를 살펴보았다.

4.1.1. chlorophyll *a*와 수온, 염분

동중국해 수괴 특성을 T-S-t diagram으로 살펴본 결과 (Fig. 3.1.5), 고온·고염의 대마난류수역은 수온 변화의 영향이 크지만, 양자강 유출수의 영향이 큰 중국대륙 연안역은 수온 변화 이외에도 염분 변화가 큰 요인으로 작용하고 있다. 따라서 chlorophyll *a*와

수괴의 변동에 영향을 미치는 해양물리인자(수온, 염분)간의 관련성을 살펴보았다. 여기서 서쪽(W)해역은 125°E 이서, 중앙부(C)해역은 $125.5^{\circ} \sim 126.5^{\circ}\text{E}$, 동쪽(E)해역은 126.5°E 이동이다. 2, 5, 8, 11월을 각각 동계, 춘계, 하계 및 추계로 정의하였다.

표면 chlorophyll *a* (Fig. 3.2.1)와 수온(Fig. 3.1.1)과의 관계는, W해역의 chlorophyll *a* 농도는 동계에서 춘계를 거쳐 하계로 갈수록 증가하였고 춘계보다 하계의 증가폭이 크게 나타났다 (Fig. 4.1.1). 또한 W해역은 하계에서 추계에 걸쳐 chlorophyll *a*가 0.4 mg/m^3 으로 다른 해역에 비해 약 7배 내외로 급격한 감소를 보였다. 반면에 C와 E해역은 수온증가와 chlorophyll *a*의 상관성이 크지 않고, E해역은 오히려 수온이 가장 낮은 동계가 하계보다 높은 상관성을 나타내었다. chlorophyll *a*와 수온의 관계에서 수심이 얇은 W해역은 chlorophyll *a*의 증감에 수온이 큰 역할을 하며, 수심이 깊은 E해역은 고온·저 chlorophyll *a*의 대마난류수 특징이 뚜렷하게 나타난다.

또한 Fig. 3.2.1과 Fig. 3.1.4에 나타낸 chlorophyll *a*와 염분에 대한 chlorophyll *a*-salinity-time diagram을 보면, 대마난류수역에 비해 대륙연안수역에서 염분 변화에 대한 chlorophyll *a* 농도가 뚜렷한 변화를 보인다 (Fig. 4.1.2). 수심이 깊은 E해역은 염분 변동이 연중 2 psu 내외로 작고 chlorophyll *a*도 0.4 mg/m^3 으로 저농도였다. C해역은 염분의 연 변동폭은 $28.6 \sim 34.3 \text{ psu}$ 로 크지만 chlorophyll *a*는 약 0.6 mg/m^3 으로 저농도를 나타내었다. 반면에 수심이 얇은 W해역은 약 $28.5 \sim 32.5 \text{ psu}$ 범위로 춘계에서 하계로, 하계에서 추계로 약 $\pm 4 \text{ psu}$ 내외로 염분이 크게 변화하고, chlorophyll *a*의 증감

폭도 E해역에 비해 2배 이상 크게 나타났다. chlorophyll *a*에 대한 수온 및 염분의 관계로부터 수심이 얇은 W해역의 chlorophyll *a*의 증감은 다른 두 해역에 비해 그 변화가 뚜렷하였다. 즉, 수온, 염분 등 환경 요인이 안정된 E해역에서는 chlorophyll *a* 값이 안정되고 그 환경 요인의 변화가 심한 W해역은 chlorophyll *a* 값의 변화가 크게 나타났다. 그리고 σ_t 값의 변화를 보면(Fig. 3.1.5), 대마난류수역인 E해역이 σ_t 가 높고 중국대륙연안수역의 W해역에서 σ_t 값이 적은

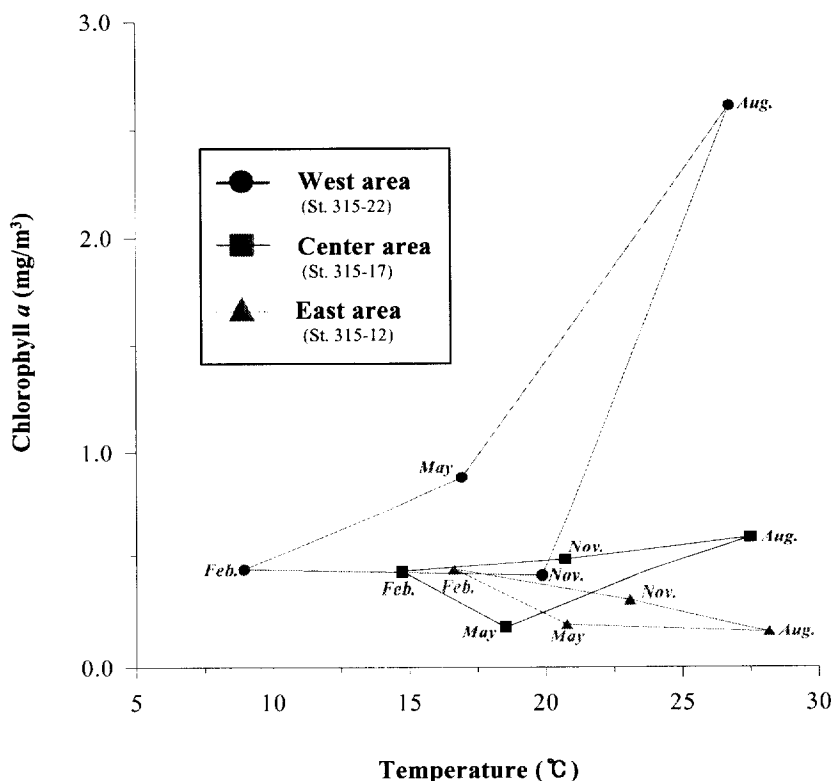


Fig. 4.1.1. Chlorophyll *a*-temperature-time (Chl-*a*-T-t) diagrams for East China Sea waters.

것은 수온차보다 염분차가 크게 영향을 주었기 때문이다. 특히 Fig. 4.1.3에서 2000~2003년 기간 중 하계 염분이 22.8 psu로 매우 낮은 2002년의 chlorophyll *a* 농도는 6 mg/m³ 이상의 고농도이고, 염분이 29 psu 내외로 연평균(28.5 psu)에 비해 높은 2003년의 chlorophyll *a* 농도는 1 mg/m³ 내외로 연평균(약 2 mg/m³)에 비해 낮게 나타나 하계 염분 변화가 chlorophyll *a* 증감에 큰 영향을 주는 주요한 인자임이 시사되었다.

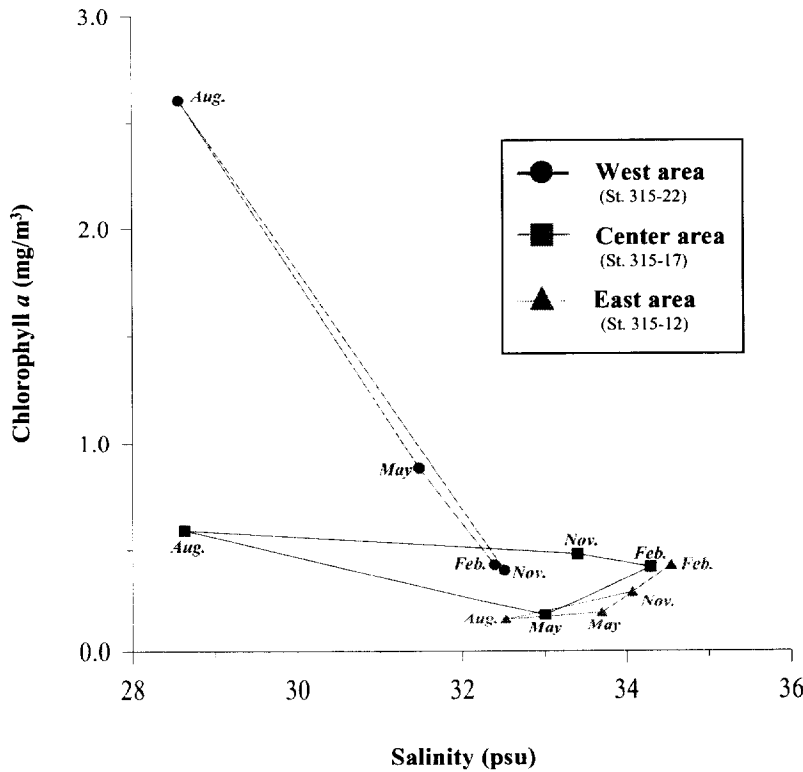


Fig. 4.1.2. Chlorophyll *a*-salinity-time (Chl-S-t) diagrams for East China Sea waters.

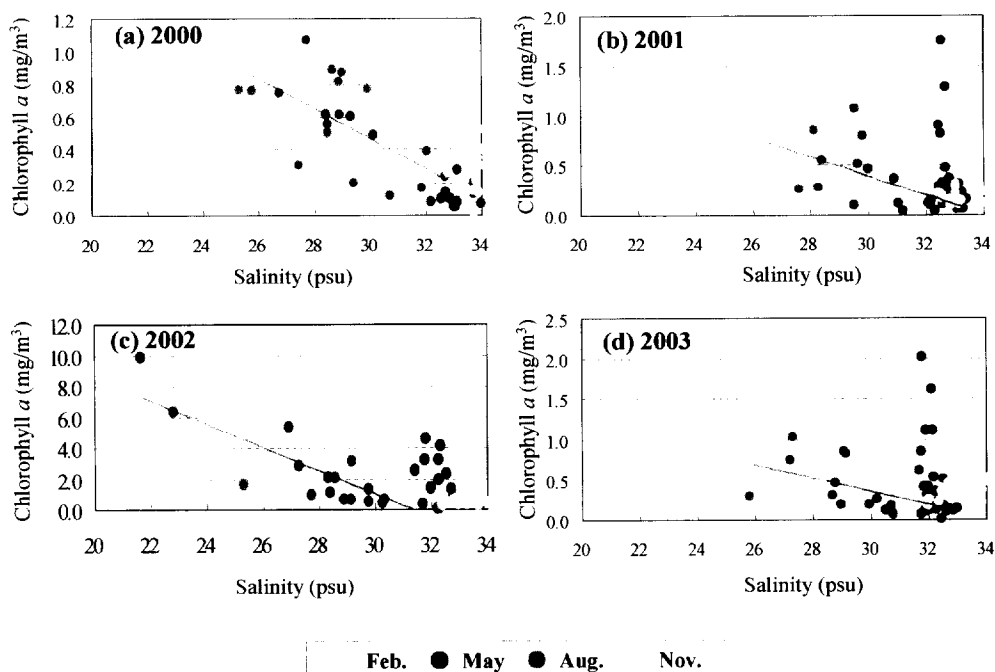


Fig. 4.1.3. Relationship between surface chlorophyll a (mg/m^3) and salinity (psu) in 2000 (a), 2001 (b), 2002 (c) and 2003 (d) in the East China Sea.

4.1.2. chlorophyll a 와 영양염

chlorophyll a -nutrient-time diagram으로 chlorophyll a 농도와 영양염 (용존무기질소, 인산인, 규산규소)간의 관련성을 살펴본 결과 (Fig. 4.1.4, Fig. 4.1.5, Fig. 4.1.6), 영양염은 W해역이 다른 해역에 비해 큰 계절 변화를 보이고, 동계에서 춘계로 가면서 식물플랑크톤의 bloom에 의한 소비로 영양염은 감소하나 chlorophyll a 농도가 증가하였다. 다시 하계로 가면서 양자강 유출수의 영양염 공급으로

춘계에 이어 bloom이 발생되어 chlorophyll *a* 농도가 급격히 증가하였다. 추계로 가면서 성층의 파괴와 함께 저층으로부터의 영양염 공급으로 표면의 영양염은 증가하지만 태양복사량의 감소로 chlorophyll *a* 농도는 급격히 감소하는 양상을 보인다.

chlorophyll *a*와 영양염의 관계에서 질산염이 다른 영양염(규산염 $r=0.5$, 인산염 $r=0.2$)에 비해 높은 상관성($r=0.6$)을 나타내었다. 이는 동중국해 영양염에 관해서 Wang *et al* (2003)이 양자강 하구 동쪽

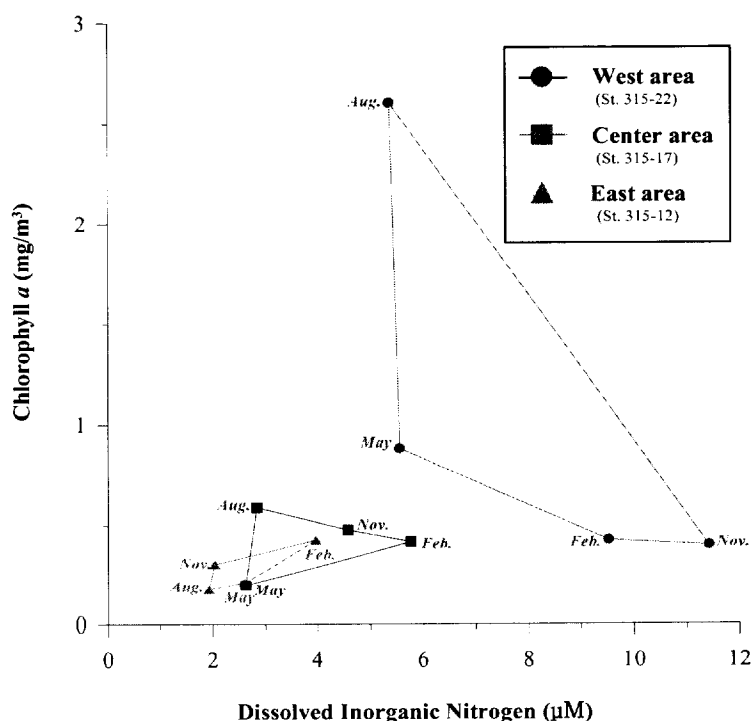


Fig. 4.1.4. Chlorophyll *a*-DIN-time (Chl-N-t) diagrams for East China Sea waters.

과 북동쪽 해역은 연중 영양염이 풍부하며, $30 < N/P$ 비로 볼 때 식물플랑크톤의 기초생산에는 질소보다는 인이 제한요소가 된다고 보고하였으며, 이러한 연구에 비해 크기는 차이가 있으나 본 연구에서도 해역의 서부에서 N/P 비 > 20 이상으로 높게 나타나 양자강 유출수의 유입과 더불어 육상에서 많은 양의 질산염이 유입되기 때문으로 생각된다. 규산염과 인산염의 경우 chlorophyll *a*와 다소 낮은 상관관을 나타낸 것은 Furuya *et al* (2003)과 Chang *et al* (2003)

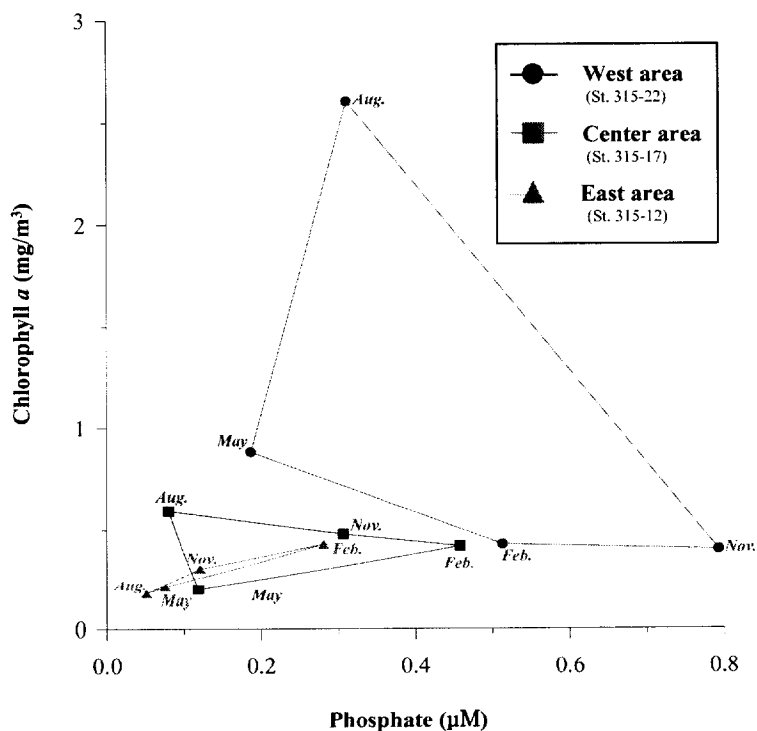


Fig. 4.1.5. Chlorophyll *a*-Phosphate-time (Chl-P-t) diagrams for East China Sea waters.

이 춘계 대륙붕 부근에서 약한 성층과 저염수의 공급으로 규조류 번식이 활발하다는 보고를 보면 규조류의 패각형성에 의해 규소의 소비에 의한 것으로 생각되며, 인산인의 경우 Edmond *et al.* (1985)의 하구역에서 낮은 인산인 농도에 대해 보고한 인산인이 현탁물질에 의해 흡착되는 이유인 것으로 사료된다.

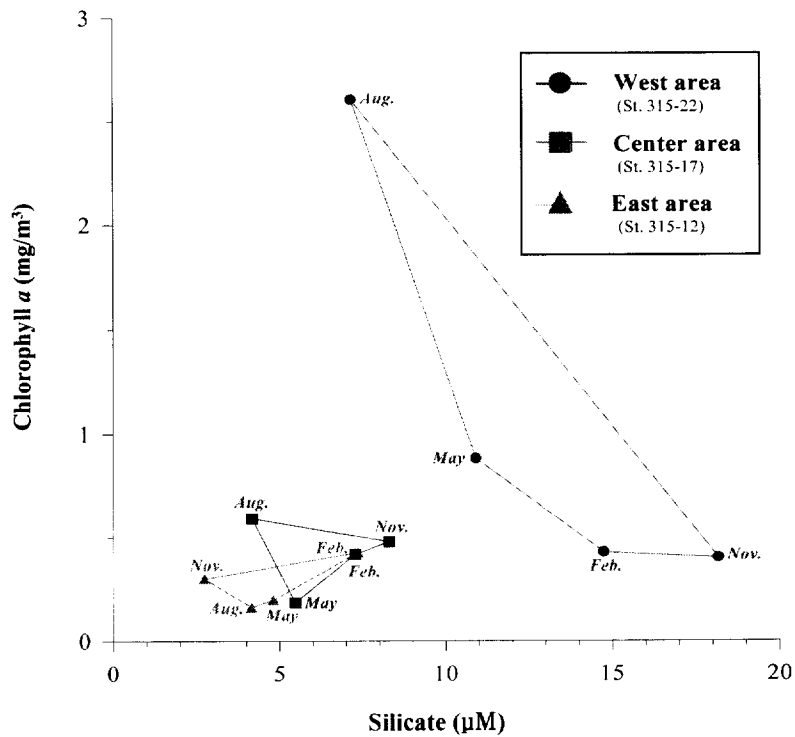


Fig. 4.1.6. Chlorophyll *a*-Silicate-time (Chl-Si-t) diagrams for East China Sea waters.

4.1.3. chlorophyll *a*와 부유물질 및 용존산소

chlorophyll *a*과 용존산소(DO) 및 부유물질(SS)간의 관계를 chlorophyll *a*-SS-time diagram으로 살펴보면 (Fig. 4.1.7, Fig. 4.1.8), C해역과 수심이 깊은 E해역에서는 부유물질의 변동에 다소 무관한 변동양상을 보이며, 수심이 얇은 W해역에서 chlorophyll *a*는 부유물질의 농도가 높은 동계와 추계에 비해 부유물질의 농도가 낮은 하계에 chlorophyll *a* 농도가 매우 높게 나타난다 (Fig. 4.1.7).

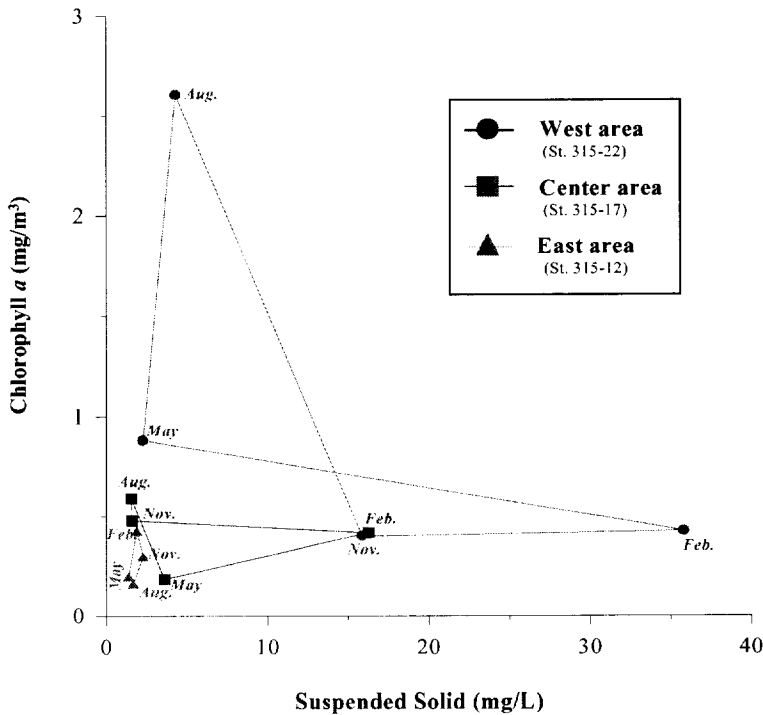


Fig. 4.1.7. Chlorophyll *a*-Suspended Solid-time (Chl-SS-t) diagrams for East China Sea waters.

이는 동계 동안의 강한 대류작용 후 점차 수괴가 안정되는 춘계의 경우 부유물질의 농도는 비교적 낮으며 풍부한 영양염과 태양복사량에 따른 식물플랑크톤 번식으로, 하계에는 강한 성층의 형성에도 불구하고 양자강 유출수로부터의 연중 가장 많은 부유물질(Yang *et al.*, 2002)과 풍부한 영양염 공급으로 인한 chlorophyll *a* 농도 증가 때문으로 생각된다.

또한 chlorophyll *a*와 용존산소 간에는 E 및 C해역에서의 용존산소 변화에 대한 chlorophyll *a* 변화는 매우 작으며, W해역은

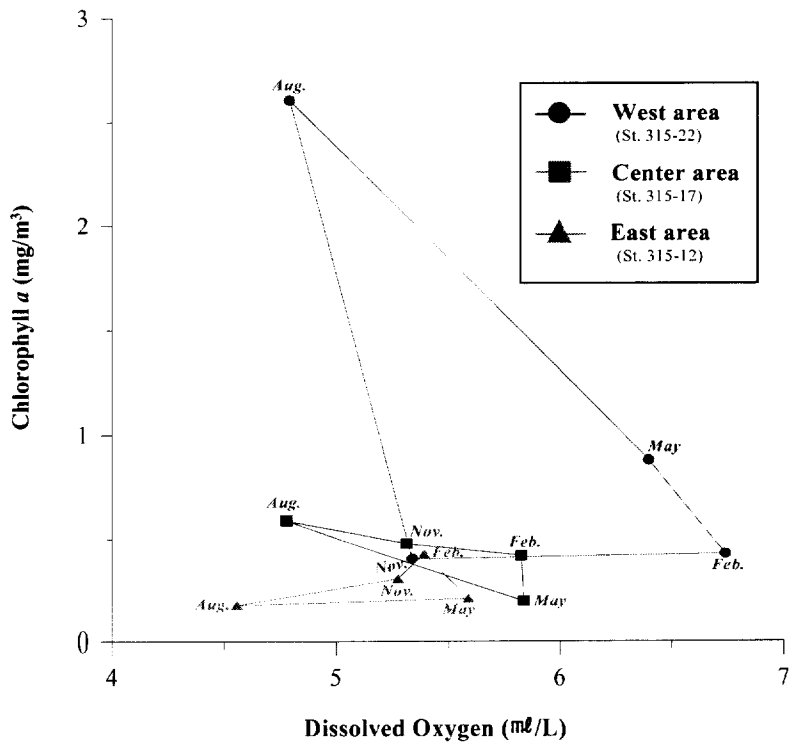


Fig. 4.1.8. Chlorophyll *a*-Dissolved Oxygen-time (Chl-DO-t) diagrams for East China Sea waters.

하계에 용존산소가 감소하면서 chlorophyll *a*는 급격히 증가하고, 다시 추계에 산소 농도가 증가함과 동시에 chlorophyll *a*의 농도는 급격히 감소하고 있다 (Fig. 4.1.8).

이상과 같이 동중국해 chlorophyll *a*에 대한 물리적(수온, 염분), 생물화학적 요인(영양염, 용존산소 등)간의 관계를 정리하면 Table 4.1와 같다. chlorophyll *a*와 해양요소간에는 춘계 및 하계에 동계와 추계보다 관련성이 크다. 수온과는 수심이 얇은 W해역의 수온이

Table 4.1. Correlation coefficients between surface chlorophyll *a* and each ocean factors

Month Factor	February	May	August	November
Temperature	-0.1	-0.6	-0.6	-0.2
Salinity	-0.2	-0.7	-0.7	-0.1
SS	-0.1	+0.6	+0.6	-0.2
DO	+0.2	+0.7	-0.1	-0.1
DIN	+0.1	+0.4	+0.6	-0.1
Phosphate	-0.4	+0.2	+0.2	-0.3
Silicate	+0.1	+0.7	+0.5	+0.1

chlorophyll *a*의 증감에 큰 역할을 하였으며, 염분과는 대마난류수역에 비해 대륙연안수역에서의 염분 변화에 대한 chlorophyll *a* 농도가 뚜렷한 변화를 보였다. 부유물질 및 용존산소와는 수심 깊은 E해역에서는 부유물질의 변동에 다소 무관한 변화양상을 보였으며, 수심 얇은 W해역에서 chlorophyll *a*는 부유물질의 농도가 낮은 하계에 매우 높게 나타났다. 용존산소와는 E해역에서의 용존산소 변화에 대한 chlorophyll *a* 변화가 매우 작았으며, W해역은 하계에 용존산소가 감소하면서 chlorophyll *a*는 급격히 증가하였다. 영양염과는 수심이 얇은 W해역에서 춘계에 영양염 감소 변화에 대해 chlorophyll *a* 농도는 증가하고, 하계로 가면서 양자강 유출수의 영양염 공급으로 chlorophyll *a* 농도는 급격한 증가를 보였다.

4.2. 식물플랑크톤 색소의 광특성

해수의 광학적 특성을 해수중 물질의 흡수계수와 후방산란계수로부터 분류되고 있다 (Morel and Prieur, 1977). 식물플랑크톤의 후방산란계수는 비교적 작기 때문에 보통 해수색(ocean color)은 식물플랑크톤의 흡수 및 무기현탁물질의 후방산란계수에 의해 나타나게 된다. 여기서 식물플랑크톤의 색소(chlorophyll *a*)가 주로 광학적 성질을 결정하고 있는 해수를 Case I 해수라 하고, 유·무기 현탁물질 등에 의한 해수를 Case II 해수라고 한다.

본 연구에서는 해수 광학적 분류에 해황상태를 덧붙여 수괴 계절변동에 수온이 염분에 비해 큰 영향으로 작용하며(Fig. 3.1.5), 수심이 깊어 부

유물질 농도가 연중 거의 변화가 없는 맑은 대마난류수역(정점 12~15)을 Case I (Fig. 4.1.9), 수괴의 변동에 수온에 비해 염분 변동이 큰 영향을 미치고, 수심이 얕아 부유물질 농도의 계절 변동이 탁월한 중국 대륙 연안수역(정점 20~22)을 Case II 해역으로 구분할 수 있다 (Fig. 4. 1.9). 해양에서 식물플랑크톤 현존량의 지표로 이용되는 chlorophyll *a* (Sathyendranath *et al.*, 1989)와 해수 흡광계수와와의 관계를 Case I 및 Case II 해수에 대해 살펴본 결과, chlorophyll *a* 흡수 밴드역인 440 nm 부근에서 최대를 보였고 (Fig. 3.3.1), chlorophyll *a*와 식물플랑크톤의 흡광계수(a_{ph})간에는 춘계과 하계에 각각 $r=0.87$ 과 $r=0.7$ 로 높은 상관성이 나타나며, 추계와 동계에는 상관계수가 각각 0.37, 0.23으로 낮게 나타났다 (Fig. 3.3.3). 또한 식물플랑크톤에 의한 비흡광계수(Fig. 3.3.4)가 대마난류수역(Case I)에서 높고, 대륙연안수역(Case II)에서 낮게 나타난 것은 식물플랑크톤의 응집효과 (package effect)에 의해 식물플랑크톤이 밀집된 대륙연안수역에 비해 빈영양 해역인 대마난류수역에서 식물플랑크톤의 태양 복사광 이용 효율이 높음을 의미한다. 이는 Ahn and Moon (1998)이 지중해와 황해연안에서 비흡광계수 비교로 chlorophyll *a*의 복사광 이용 효율을 파악한 결과와 유사하게 나타났으며, 비흡광계수 $a_{ph}^*(440)$ 과 chlorophyll *a*간의 관계식은 $a_{ph}^*(440)=0.0470chl-a^{-0.6496}$ 로 Ahn and Moon (1998), Bricaud *et al.* (1995)의 $a_{ph}^*(440)=0.0391chl-a^{-0.369}$, $a_{ph}^*(440)=0.0403chl-a^{-0.332}$ 결과와에 비해 다소 차이를 보였는데 이는 황해연안과 같은 Case II 성격이 강한 해수역인 동시에 지중해와 같은 Case I 대마난류수역의 혼합 해역이기 때문으로 생각된다.

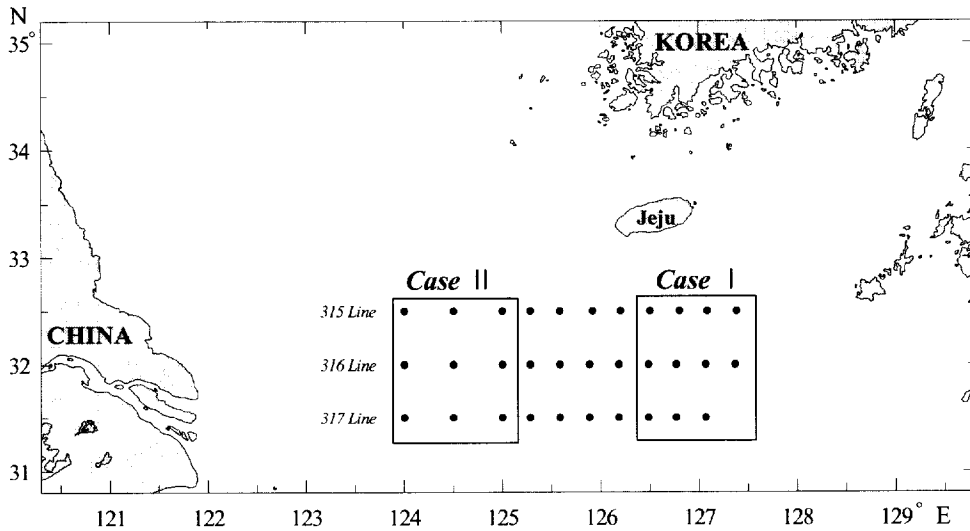


Fig. 4.1.9. Areas of the Case I and Case II water in this study.

4.3. 위성 chlorophyll *a* 분포와 추정

위성 관측에 의한 표면 chlorophyll *a* 농도 분포는 시·공간적으로 변동이 크다 (Fig. 3.4.1). 동해와 같은 Case I 해수에서 식물플랑크톤 bloom의 시기는 춘계(4~5월)에 최대를 보이나 (Kim *et al.*, 2000), 동중국해와 같이 Case II 해수의 성격이 강한 곳에서는 하계(8월)에 최대를 나타내었다. 또한, 식물플랑크톤 bloom의 지속기간도 4월~9월까지로 매우 길며, 양자강 연안역에서부터 제주도 근해역까지 점진적으로 확장 분포하였다. 이는 동해의 경우 외양의 성격이 강하여 식물

플랑크톤의 bloom이 주로 해양의 가열과 냉각에 의한 혼합층 형성 깊이에 따라 결정되는 반면 동중국해는 춘계의 태양복사량 증가와 하계동안 저염의 양자강수에 의한 영양염 공급으로 해수 표면에서 식물플랑크톤의 bloom이 발생하는 것으로 판단된다.

위성 원격탐사로 추정한 현장 chlorophyll *a* (Fig. 3.4.3)는 현장 관측 농도에 비해 위성 chlorophyll *a*가 높은 농도 분포를 나타내었는데 이는 전지구 위성 chlorophyll *a* 알고리즘을 단순 적용한 오류인 것으로 생각된다. 또한 경험적 관계식을 적용한 결과에서는 전지구 알고리즘에 비해 농도 크기는 감소하였으나 현장 관측치와 다소 차이를 보였다. Case I 해역인 대마난류수역에서는 현장 관측치에 비해 오히려 낮은 농도 분포 결과를 나타내었는데, 향후 위성과 현장 관측 chlorophyll *a*간의 정도 높은 보정을 위해서는 우선적으로 해황특성을 고려하여 해역을 구분한 후, 현장 해양요소의 광학적 특성을 파장별로 파악하고 이를 위성관측 복사도와 비교한 알고리즘의 개발이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 동중국해 생산력의 지표가 되는 식물플랑크톤 색소인 chlorophyll *a* 변화 특성을 밝히기 위하여, chlorophyll *a* 와 해양환경인자간의 관계와 해수광학특성을 조사하였다. 위성 원격탐사에 의한 chlorophyll *a* 분포 변화를 파악하고, 정확도가 높은 위성 chlorophyll *a* 농도를 추정하기 위하여 국립수산과학원의 동중국해 해양관측자료와 SeaWiFS 위성관측 chlorophyll 자료를 사용하였다. chlorophyll *a*-해양인자-시간 diagram 분석방법을 이용하여 chlorophyll *a* 농도와 해양인자간의 변동 관계를 살펴보았으며, 흡광도 분석을 통하여 해수광학특성을 파악하였다.

동중국해에서의 chlorophyll *a*의 고농도 분포는 계절적으로는 춘계(5월)와 하계(8월)에 나타났다. 공간적으로는 125°E 이서의 연안역이 126.5°E 이동 외해역에 비해 약 3배 이상의 고농도 분포를 보인다. 수온과 염분 등 환경 요인이 비교적 안정된 대마난류수역에서는 chlorophyll *a* 농도의 변화가 안정되고, 그 환경 요인의 변화가 큰 대륙연안수역에서 chlorophyll *a* 농도 변화가 크게 나타난다.

춘계와 하계에 chlorophyll *a*와 해양요소간의 상관성을 살펴보면, 수온과는 수심이 얇은 서쪽해역의 수온이 chlorophyll *a*의 증감에 큰 영향을 미치고, 염분과는 역상관성을 가진다. 대마난류수역에 비해 대륙연안수역에서의 염분변화에 대한 chlorophyll *a*의 농도 변동이 크고, 하계 염분 변화가 chlorophyll *a* 증감에 큰 영향을 준다.

동중국해는 해수 광학적 분류와 해황상태로 크게 두 개의 해역으로 구분된다. 첫 번째로 맑은 대마난류수역은 Case I 해역, 두 번째로 탁한 중국 대륙연안수역은 Case II 해역이다. 동중국해에서 Case I 해역의 해양환경요소의 특징은 수심이 깊어 부유물질 농도가 연중 거의 변화가 없고, 수괴 계절 변동에 수온이 염분에 비해 큰 영향으로 작용한다. Case II 해역은 수심이 얕아 부유물질의 농도가 높고, 계절변동이 심하며, 수괴의 변동에 수온에 비해 염분 변동이 큰 영향을 미치는 해역이다.

위성 관측에 의한 동중국해 chlorophyll *a* 농도 분포는 시,공간적 변동이 크다. Case II 해수의 양상이 강한 동중국해에서는 식물플랑크톤 bloom의 지속기간은 4월~9월로 길며, 하계(8월)에 chlorophyll *a*가 최대 농도를 보인다. bloom의 분포는 양자강 연안역에서부터 제주도 근해역까지 넓게 확장 분포하는 특징을 보인다.

위성탐사와 현장관측 chlorophyll *a* 농도간의 경험적 알고리즘을 이용해 정확도가 높은 위성추정 chlorophyll *a* 농도를 구할 수 있다. 위성추정 chlorophyll *a*는 $chl-a = 0.1681exp^{0.6218 OC2\ chl-a}$ 로 동중국해와 같이 Case I 과 Case II 성격이 혼합된 해역에서 위성 추정 chlorophyll *a* 농도를 산출하는 기초가 될 것으로 기대된다.

또한 향후 위성과 현장 chlorophyll *a*의 보정을 보다 정밀히 하기 위해서는 우선적으로 해황특성을 고려하여 해역을 구분하고, 현장 해양요소의 광학적 특성을 파장별로 파악한 후 이를 위성의 radiance값과 비교하는 알고리즘의 개발이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문을 일궈내기까지 너무나 많은 것을 배우고 체험했던 소중한 시간을 가졌습니다. 이 작은 결실을 남기고 아쉬운 마음과 함께 새로운 삶의 무대로 나아가고자 합니다.

지난 박사과정 동안 너무나도 많은 사랑과 이해로 무리 없이 학업을 수행할 수 있도록 이끌어주신 조규대 교수님께 감사드립니다. 교수님께는 감사하다는 말로는 스승의 가르침과 사랑을 다 표현할 수가 없습니다. 교수님의 제자로 부끄럽지 않도록 어디에서나 열심히 하겠습니다. 언제나 용기를 북돋아 주시고 아낌없는 조언으로 논문을 심사해 주시고 세심히 지적해주신 한국해양대학교 윤종휘 교수님, 부경대학교 김동선 교수님, 국립수산물과학원 최용규 박사님 그리고 꼼꼼한 교정과 조언을 해주신 국립수산물과학원 김상우 박사님께 깊이 감사드립니다. 학문적 가르침은 물론 애정과 관심으로 해주신 강용균 교수님, 홍철훈 교수님, 박미옥 교수님께도 감사드립니다. 늘 온화한 미소로 대해주시고, 제자 잘 되기를 바라시고 늘 염려해 주시는 이재철 교수님, 김석운 교수님께 깊이 감사드립니다. 학부때부터 꾸준한 관심과 애정으로 지켜봐 주시고 격려해주시는 양한섭 교수님, 허성희 교수님, 문창호 교수님께도 머리숙여 감사드립니다.

따뜻한 격려를 주신 국립수산물과학원 박철 부장님, 이필용 소장님 그리고 연구를 수행함에 많은 도움을 주시고 부족한 후배 잘 되라고 조언해주신 해양연구팀장이신 정희동 박사님께 감사드립니다. 언제나 관심과 격려를 해주신 서영상 박사님, 성기탁 연구관님, 정규귀 박사님, 윤원득 박사님, 양준용 연구사님께도 감사드립니다. 항상 사기 북돋워 주시고 안부 물으시던 백철인 부장님, 양원석 팀장님, 이삼근 팀장님께도 진심으로 감사드립니다.

박사과정 동안의 따뜻한 보금자리였던 수산물리해양학실 많은 것을 배우고 많은 것을 추억케 하는 곳이었습니다. 슬프거나 기쁠 때도 항상 마음 곁에 있어주었으며, 이젠 눈빛만으로도 마음이 통하는 친구 기영, 재동, 재영, 진호, 월애. 정말 고맙다는 말을 전합니다. 지금까지 누구보다도 애정과 사랑을 준 후배, 이충일 박사 고마웠다는 말과 함께 앞으로도 더욱 멋진 이박사가 바랍니다. 또, 동생같이 챙겨주고 싶은 후배 박성은 박사 항상 고맙게 생각합니다. 모두들 행복하세요. 연구실 생활 전반에 대해서 많은 조언을 하고 애기해준 권철휘 박사, 배상완 선배, 동생같이 챙겨주고 아껴준 안두해 박사님, 부산대학교 강창근 교수님, 경상대학교 김무찬 교수님, 김종빈, 최광호, 고우진 선배님께도 너무 감사하다는 말을 드립니다. 또 자신의 일처럼 도움을 준 이나경, 조용문에게도 고마움을 전합니다.

언제나 많은 관심과 사랑을 보내주시는 장인어른, 장모님 감사드립니다. 언제나 처남 잘되길 응원해 주시는 자형, 누나, 형님에게 고맙습니다. 끝까지 파이팅을 외쳐주던 처제들에게 고맙다는 말을 전합니다.

지금의 이 결실을 맺을 수 있도록 큰 사랑으로 저를 지켜주시고 믿어주신 아버지, 어머니, 정말 감사합니다. 10년이라는 시간동안, 항상 곁에서, 격려해주고 이해해 준 아내에게 정말 고맙다는 말을 전합니다. 밤낮으로 “아빠 회사가? 또?”, “짜장면 먹었어?”라고 불만과 걱정을 종알거리던 아들 성규, 세영에게 기쁨을 전합니다. 그리고 사랑합니다. 이제 당신의 사랑에 보답할 수 있는 아들과 남편, 아빠가 되겠습니다.

박사학위를 받는 지금이 연구자로서 지나긴 여정의 시작이라 생각합니다. 앞으로 더욱 연구에 정진하여 여러분들의 기대에 어긋나지 않고 모두의 사랑에 보답하겠습니다.

참 고 문 헌

- APHA AWWA WPCF, 1985, Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, pp. 394~396.
- Ahn, Y. H and J. E. Moon. 1998. Specific Absorption Coefficients for the Chlorophyll and Suspended Sediment in the Yellow and Mediterranean Sea. *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, 14(4): pp. 353~365.
- Bricaud A., M. Babin, A. Morel and H. Claustre, 1995. variability in th chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton : Analysis and parameterization. *J. Geophysic. Res.*, 100(C7): pp. 133321~13332.
- Chang, J., F. K. Shiah, G. C. Gong and K. P. Chiang. 2003. Cross-shelf variation in carbon-to-chlorophyll a ratios in the East China Sea, summer 1998. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(6-7): pp.1237~1247.
- Cai, D., X. Shi, W. Zhou, W. Liu, S. Zhang, Y. Cao and Y. Han. 2001. Sources and transportation of total suspended matter and sediment in the southern Yellow Sea. *Proceedings of 2nd China-Korea Symposium on Sedimentary Dynamics and Palaeoenvironmental Changes in the Yellow Sea*, pp. 9~20.
- Chen, C. S., R. C. Beardsley, R. Limeburner and K. Kim, 1994. Comparison of winter and summer hydrographic observations in the Yellow and East China Seas and adjacent Kuroshio during 1986. *Continental Shelf Res.*, 14: pp. 909~929.

- Chen, C. T. A., 1996. "The Kuroshio intermediate water is the major source of nutrients on the East China Sea continental shelf". *Oceano. Acta*, 19(5): pp. 523~527.
- Chen, Z and L. Yu, 2001. The Yangtze River ; an introduction. *Geomorphology* 41: pp. 73~75.
- Chikuni, S. 1985. The fish resources of the northwest Pacific. FAO Fisheries Technical Paper 266, pp. 6~7.
- Cho, K. D. 1986. Environment of the Purse-Seiner fishing ground in the East China Sea. *Bull. Korean. Fish. Tech. Soc.* 22(4): pp. 104~116. (in korean)
- Choi, B. H and K. S. Suh, 1992. Computation of Meteorologically-Induced Circulation on the East China Sea using a Fine Grid Three-dimensional Numerical Model. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 4(1): pp. 45~58. (in korean)
- Edmond, J. M., A. Spivack B. C. Grant, Hu Ming-Hui, C. Zexiam, C. Sung and Z. Xiushau, 1985. Chemical dynamics of the Changjiang estuary. *Cont. Shelf Res.*, 4: pp. 17~36.
- Furuya, K., M. Hayashi, Y. Yabushita and A. Ishikawa, 2003. Phytoplankton dynamics in the East China Sea in spring and summer as revealed by HPLC-derived pigment signatures. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 50(2): pp. 367~387.
- Gong, G. C., Liu, K. K, and Pai, S.C., 1995. Prediction of nitrate concentration from two end member mixing in the Southern East China Sea. *Continental Shelf Research* 15: pp.

827~842.

- Gong, G. C and Liu G. J., 2003a. An empirical primary production model for the East China Sea. *Continental Shelf Research* 23: pp. 213~224.
- Gong, G. C., Wen Y. H. Wang, B. W and G. J. Liu, 2003b. Seasonal variation of chlorophyll a concentration, primary production and environmental conditions in the subtropical East China Sea. *J. Deep-Sea Research* part II 50: pp. 1219~1236.
- Hwang, K. S., 1992. Relationship between the Bottom Oceanic Conditions and the Catch in the China Sea in Autumn. Master degree thesis, National Fisheries University of Pusan. 41 pp. (in korean)
- Jeon, H. J and H. S. An. 1997. Numerical Simulation of the Circulation and Suspended Materials Movement in the Yellow Sea and the East China Sea by Tidal Residual and Wind -Driven Current. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 18(6):529~539. (in korean)
- Kim, S. S, W. J. Go, Y. J. Jo, P. Y. Lee, K. A. Jeon, 1998. Low Salinity Anomaly and Nutrient Distribution at surface Waters of the South Sea of Korea during 1996 Summer. *The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanogr.*, 3(3): pp. 165~169. (in korean)
- Kim, Y. S. 1996. Estimate of Heat Flux in the East China Sea. *Journal of Korean Fish. Society*, 29(1): pp. 84~91. (in korean)
- Kim S. W., S. Saitoh, D. S. Kim. 2002. Spatial Distribution of

- Pigment Concentration Around the East Korean Warm Current Region Derived from Satellite Data. *Journal of the Korean Fisheries Society*, 35(3): pp. 265~272. (in korean)
- Kim S. W., S. Saitoh, J. Ishizaka, Y. Isoda and M. Kishino. 2000. Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentrations in the Japan Sea derived from CZCS images. *J. of Oceanography* 56: pp. 527~538.
- Kishino, M., M. Takahashi, N. Okami and S. Ichimura. 1985. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea. *Bull., Mar. Sci.*, 37: pp. 634~642.
- Kiyomoto, Y. K. Iseki and K. Okamura, Ocean Color Satellite Imagery and Shipboard Measurements of Chlorophyll a and Suspended Particulate Matter Distribution in the East China Sea. *Journal of Oceanography*, 57(1): pp.37~45.
- Lee H. J., K. T. Jung, M. G. G. Foreman, J. Y. Chung, 2000. A three-dimensional mixed finite-difference Galerkin function model for the oceanic circulation in the Yellow Sea and the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 20(8): pp.863~895.
- Liu, K. K, Gong, G. C. Lin, S. Shyu, C. Z. Yang, C. Y. Wei C. L. Pai, S. C, Wu C. K, 1992. The year-round upwelling at the shelf break near the northern tip of Taiwan as evidenced by chemical hydrography. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 3: pp. 234~276.
- Morel, A. and L. Prieur, 1977. Analysis of variations in ocean color, *Limnol, Oceanogr.*, 22: pp. 709~722.
- Nishimura, S., 1965, The zoogeographical aspects of the Japan

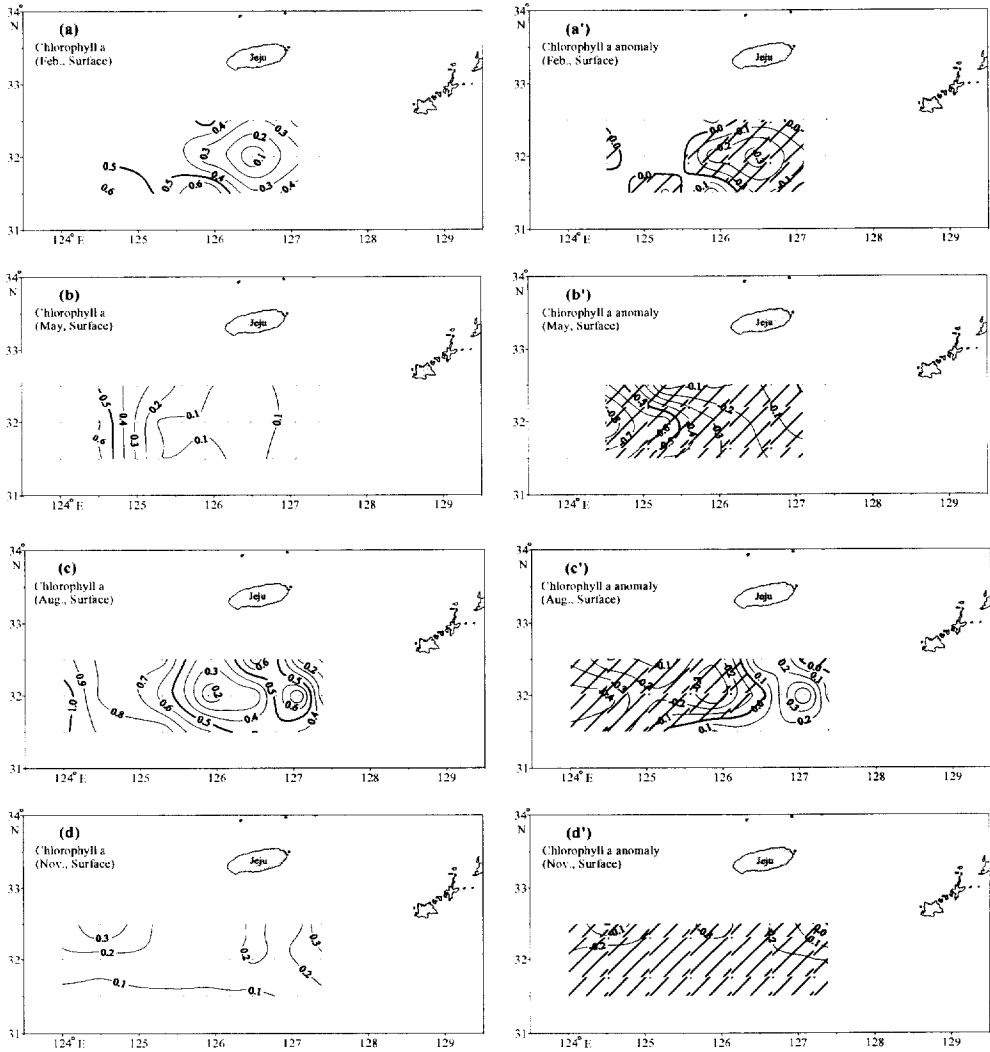
- Sea, Part II, Publ. Seto Mar. Biol. Lab., 13(2): pp. 81~101.
- Oh, H. J., 1999. Ecological characteristics of phytoplankton in the northern part of east China sea. Doctor degree thesis, Pusan National University. 192 pp. (in korean)
- O'Reilly, J.E., S. Maritorena, B.G. Mitchell, D.A. Siegel, K.L. Carder, S.A. Garver, M. Kahru, and C. McClain, 1998: Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *J. Geophys. Res.*, 103: pp. 24,937~24,953
- Pang, I. G and I. S. Oh, 1995. Warm Water Circulation and its Origin by Sea Level Fluctuation and Bottom Topography. *Journal of Korean Fish. Society*, 28(5): pp.677~697. (in korean)
- Parson, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press.
- Rho, J. H., 2000. A study on the phytoplankton distribution and primary production in the yellow sea and the east China sea. Doctor degree thesis, Inha National University, 130pp.
- Sathyendranath S., Trevor P., Carla M. C., Roderick E. W. and M. R. Lewis, 1989. Remote sensing of oceanic primary production: computations using a spectral model. *Deep Sea Research*, 36(3), pp. 431~453.
- SeaSpace.1993. TeraScan Package Manual 2.4.
- Seo, J. W., 1999. Water masses and zooplankton distribution in the Northern East China Sea in summer of 1997 and winter of 1998. Master degree thesis, Chungnam National University. (in korean)
- Shin, H. R. S. C. Hwang and C. H. Kwak, 2001. Seasonal

- distribution of oceanic conditions and water mass in the Korea Strait and the East China Sea: Correction of atmosphere cooling effect. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 22(1): pp. 47~64. (in korean)
- Shin, K. S., 1997. In situ ingestion rate and grazing impact of calanoid copepods on phytoplankton in the yellow sea and east china sea, Doctor degree thesis, Inha National University, 180 pp. (in korean)
- Son, Y. T, S. H. Lee, J. C. Lee, J. C. Kim, 2003. Water masses and frontal structures in winter in the Northern East China Sea. *The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanogr.*, 8(3): pp. 327~339. (in korean)
- Tang, D. L., I. H. Ni, F. E. Muller-Karger and Z. J. Liu, 1998. Analysis of annual and spatial patterns of CZCS-derived pigment concentration on the continental shelf of China. *Continental Shelf Research* 18: pp. 1493~1515.
- Truper H. G. and C. S. Yentsch, 1967. Use of glass fiber filters for the rapid preparation of in vivo absorption spectra of photosynthetic bacteria. *J. Bacteriol.*, 94, pp. 1255~1256.
- Wang, B. D., X. L. Wang and R. Zhan. 2003. Nutrient conditions in the Yellow Sea and the East China Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 58, pp. 127~136.
- Wong, G.T.F., K.K. Liu and S.C. Pai, 1998. "Excess Nitrate' in the East China Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 46, pp. 411~418.
- Yanagi, T. S. Takahashi, A. Hoshika and T. Tanimoto, 1996.

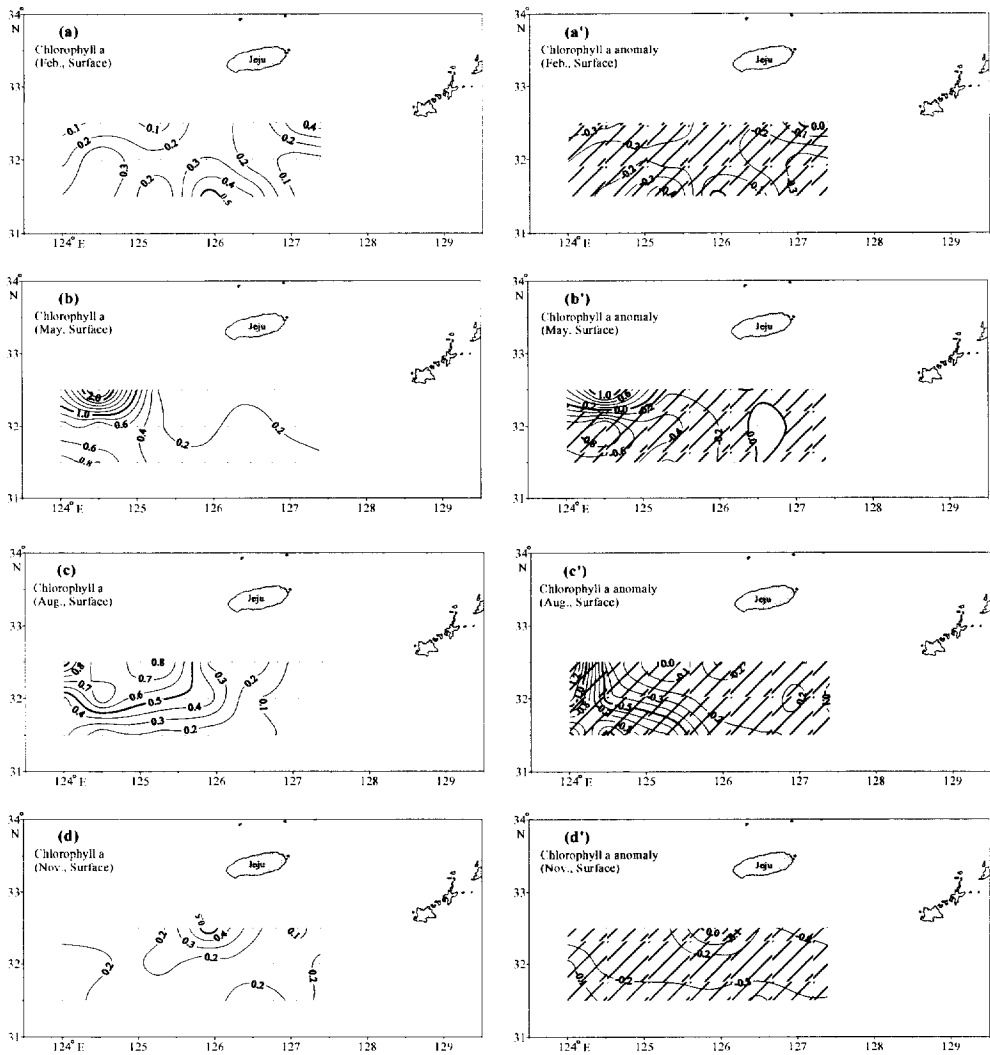
- Seasonal Variation in the Transport of Suspended Matter in the East China Sea. *Journal of Oceanography*, 52(5): pp.539 - 552.
- Yang, S. L., I. M. Belkin, A. I. Belkina, Q.Y. Zhao, J. Zhu and P. X. Ding, 2003. Delta response to decline in sediment supply from the Yangtze River: evidence of the recent four decades and expectations for the next half-century. *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.* 57, pp. 689~699.
- Yang, S. L., Q. Y. Zhao and I. M. Belkin, 2002. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze river and the influences of human activities. *J. of Hydrology* 263, pp. 56~71.
- Yang, Y. J., S. H. Kim and H. K. Rho, 1998. A Study on the Temperature Fronts observed in the South-West Sea of Korea and the Northern Area of the East China Sea. *Journal of the Korean Fisheries Society*, 31(5): pp. 695~706. (in korean)
- Yoon, Y. H., J. S. Park, H. Y. Soh, D. J. Hwang, 2003. Spatial Distribution of Phytoplankton Community and Red Tide of Dinoflagellate, *Prorocentrum donghaiense* in the East China Sea during Early Summer. *Korean Journal of Environmental Biology*, 21(2): pp. 132~141. (in korean)
- Zhang Q. L. and X. C. Weng, 1996. Analysis of water masses in the south Yellow Sea in Spring. *The Yellow Sea*, 2(1): pp. 74~82.
- 井上尚文, 1975. 東シナ海陸棚上の海底流動. *海洋科学*, 7(1): pp. 12~19.

Appendix

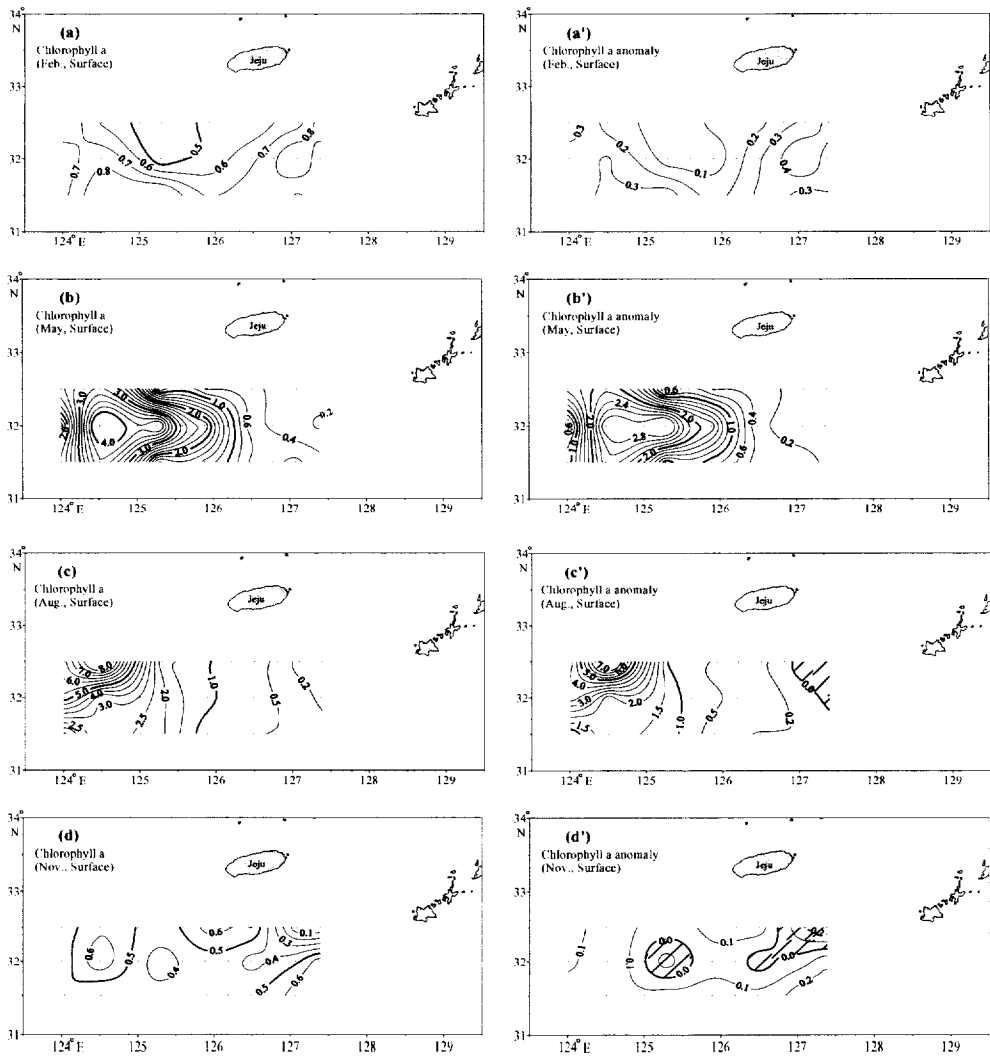
(연별 chlorophyll *a*의 수평, 연직 분포와 편차)



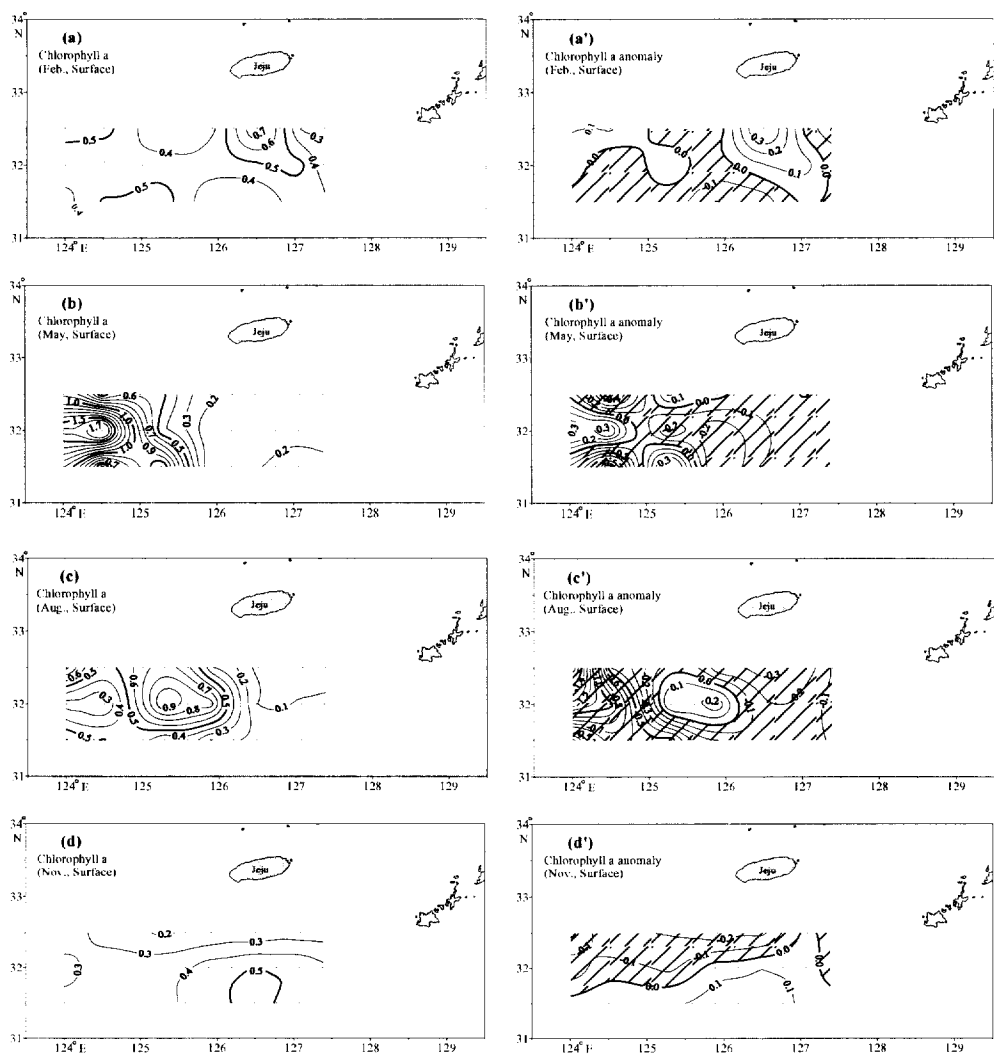
Appen. 1.1. Distributions of measured surface chlorophyll a (mg/m^3) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2000.



Appen. 1.2. Distributions of measured surface chlorophyll a (mg/m^3) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2001.

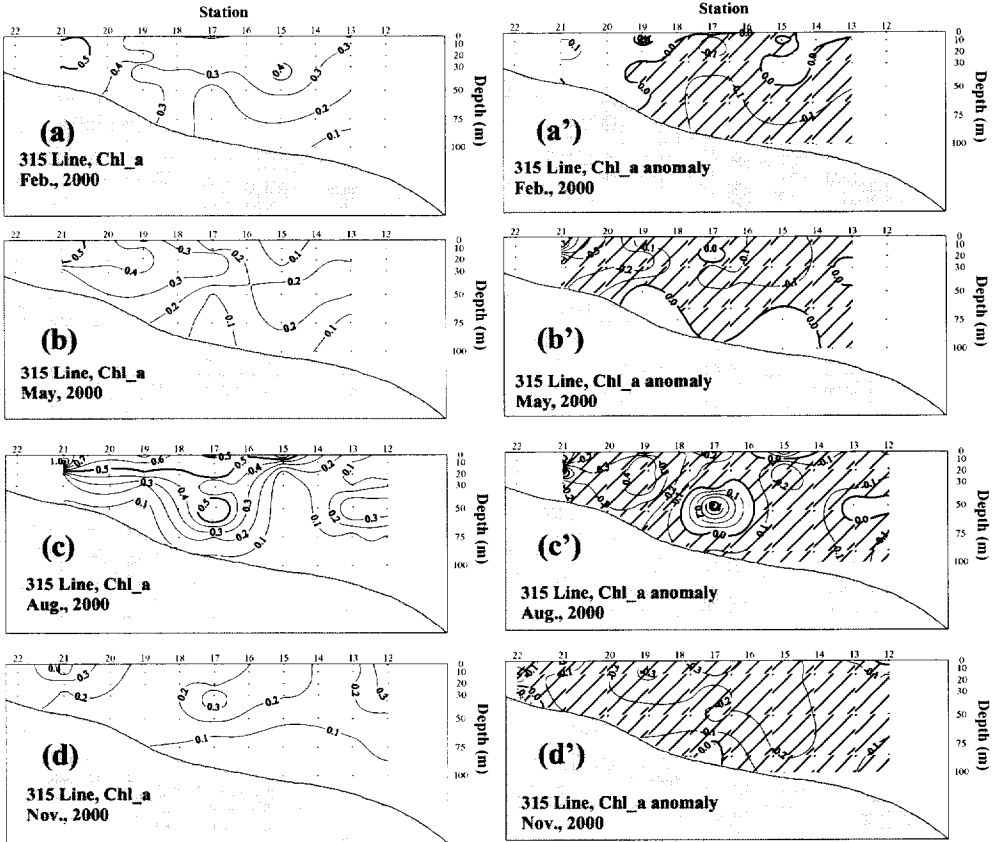


Appen. 1.3. Distributions of measured surface chlorophyll a (mg/m^3) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2002.



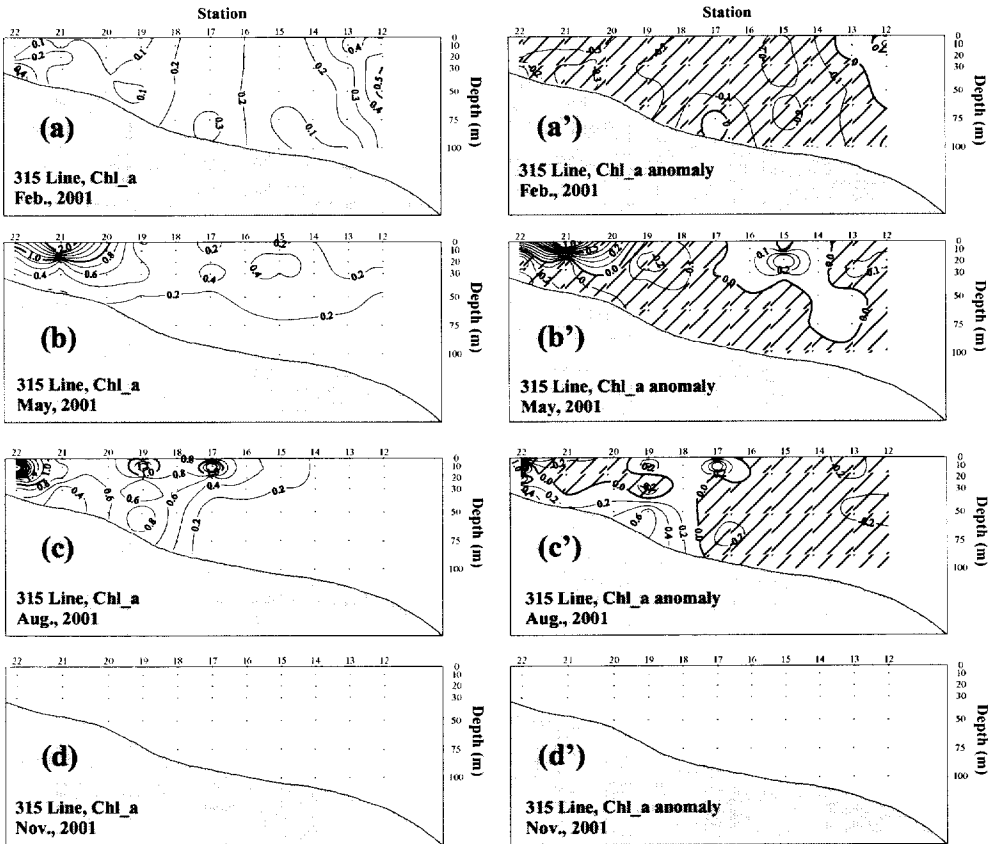
Appen. 1.4. Distributions of measured surface chlorophyll a (mg/m^3) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2003.

315 Line, 2000



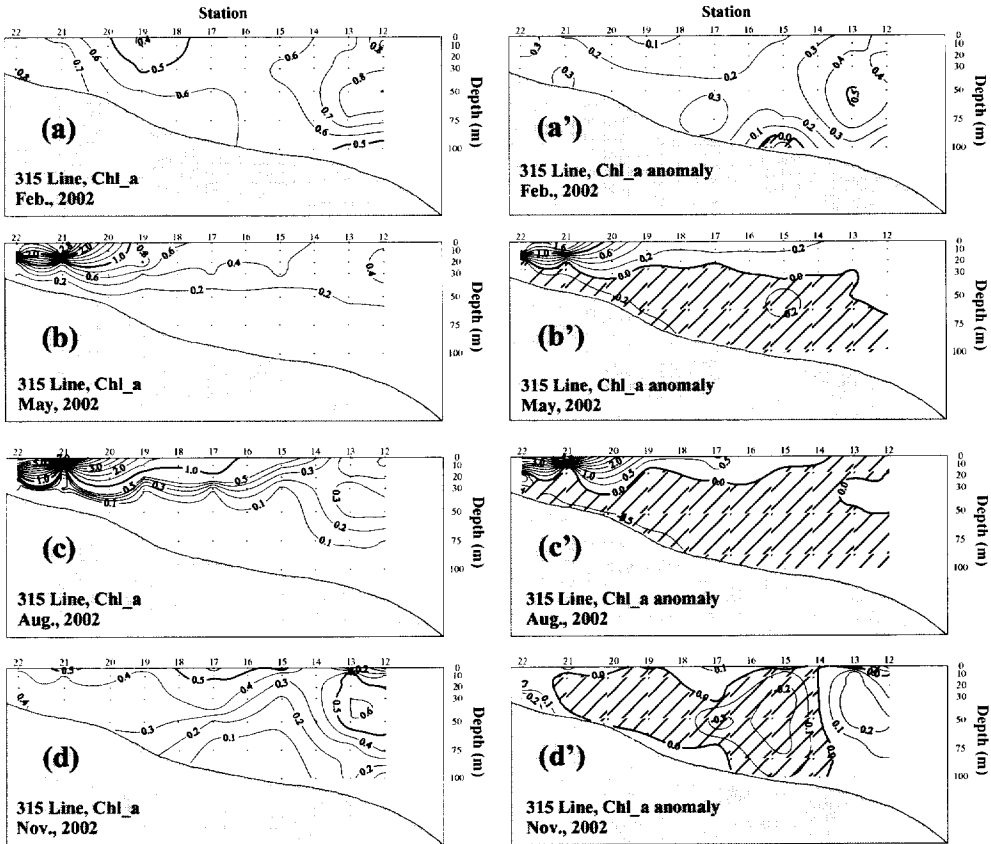
Appen. 2.1. Vertical distributions of measured chlorophyll *a* (mg/m³) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2000.

315 Line, 2001



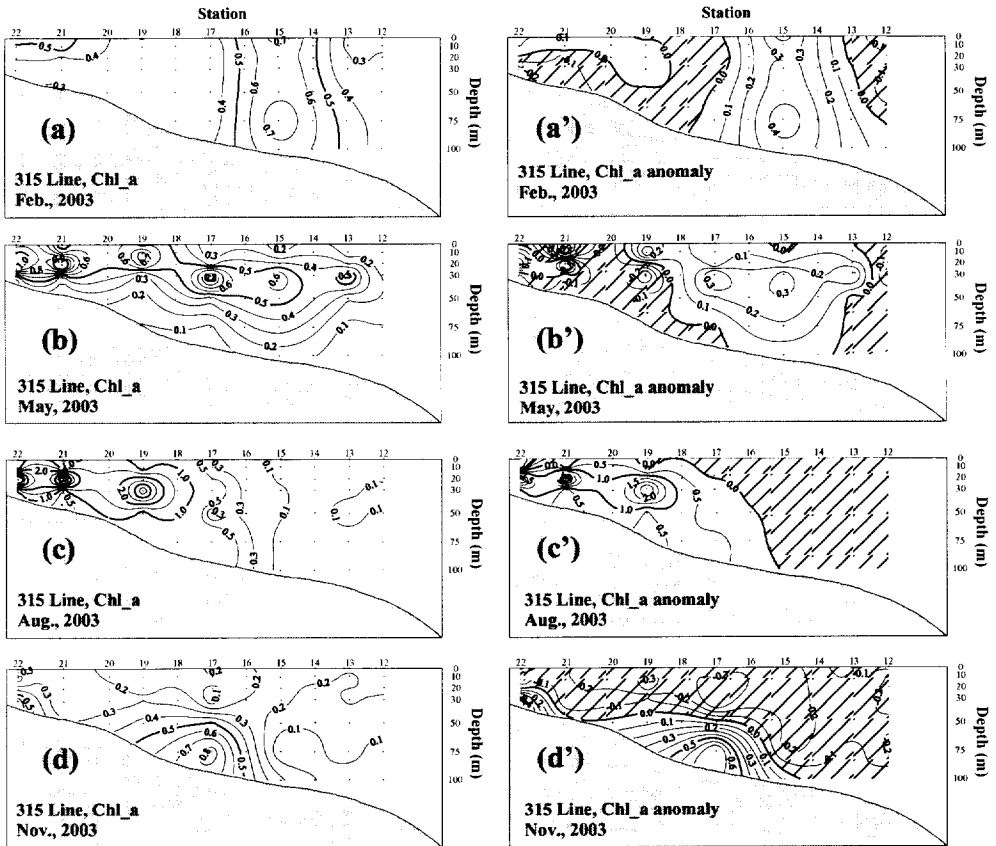
Appen. 2.2. Vertical distributions of measured chlorophyll *a* (mg/m³) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2001.

315 Line, 2002



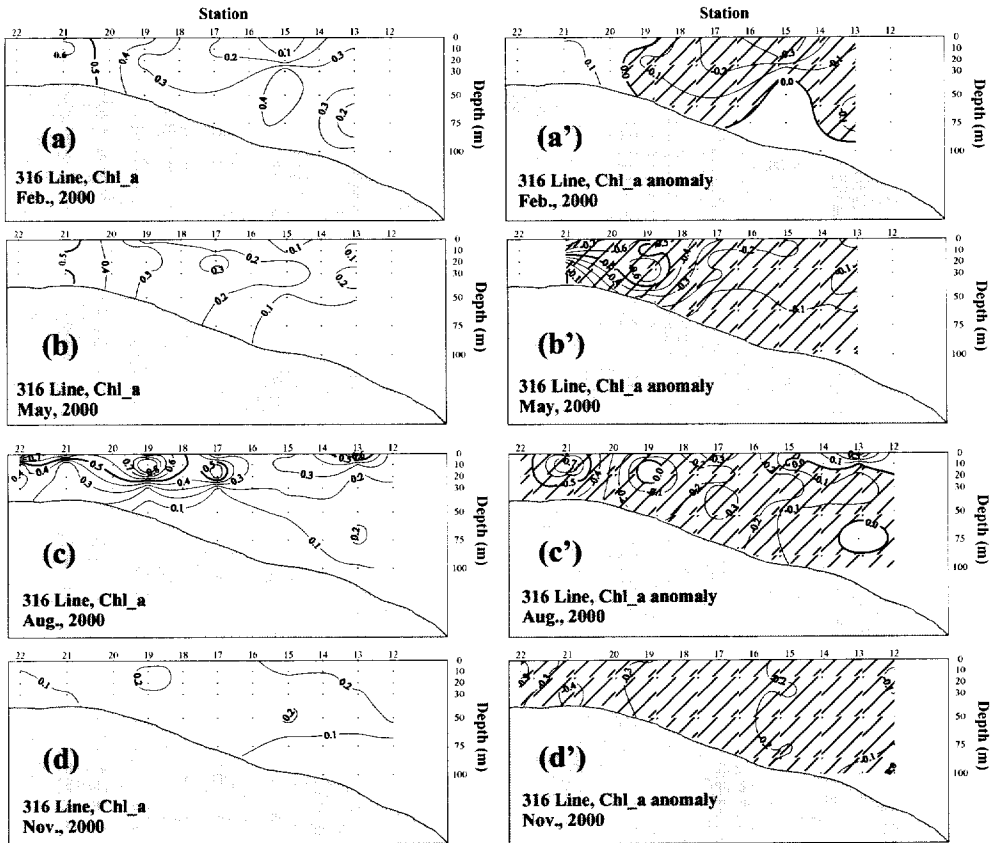
Appen. 2.3. Vertical distributions of measured chlorophyll *a* (mg/m³) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2002.

315 Line, 2003



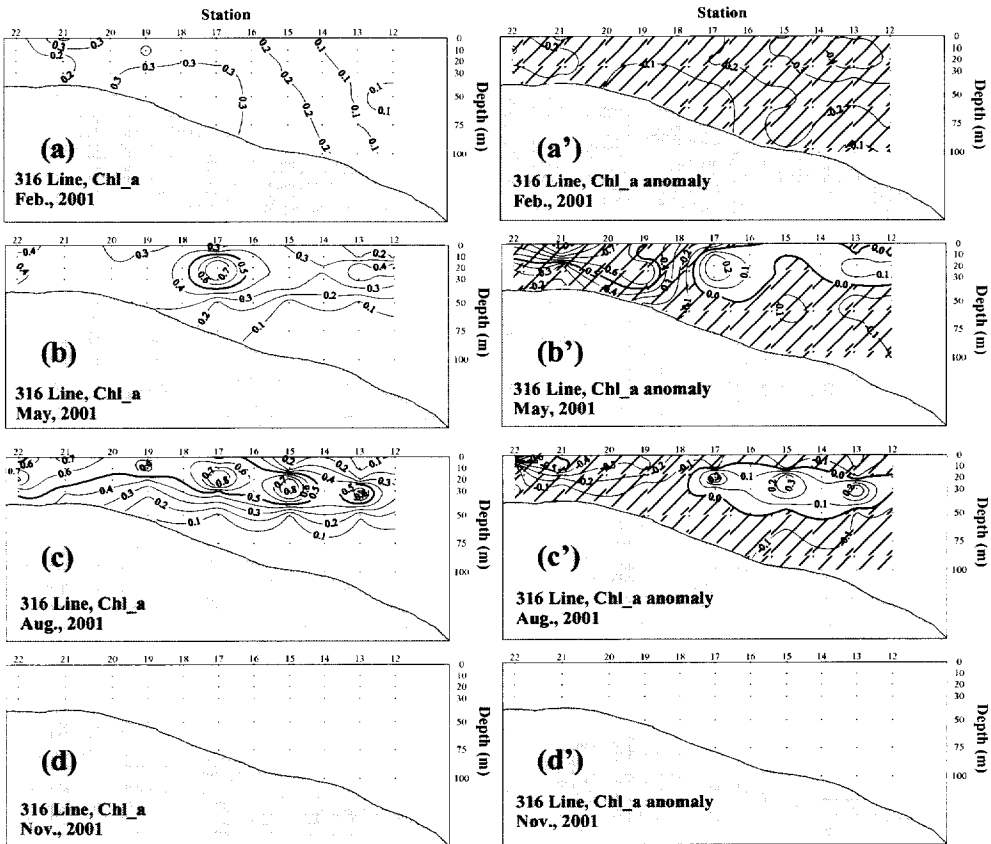
Appen. 2.4. Vertical distributions of measured chlorophyll *a* (mg/m³) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2003.

316 Line, 2000



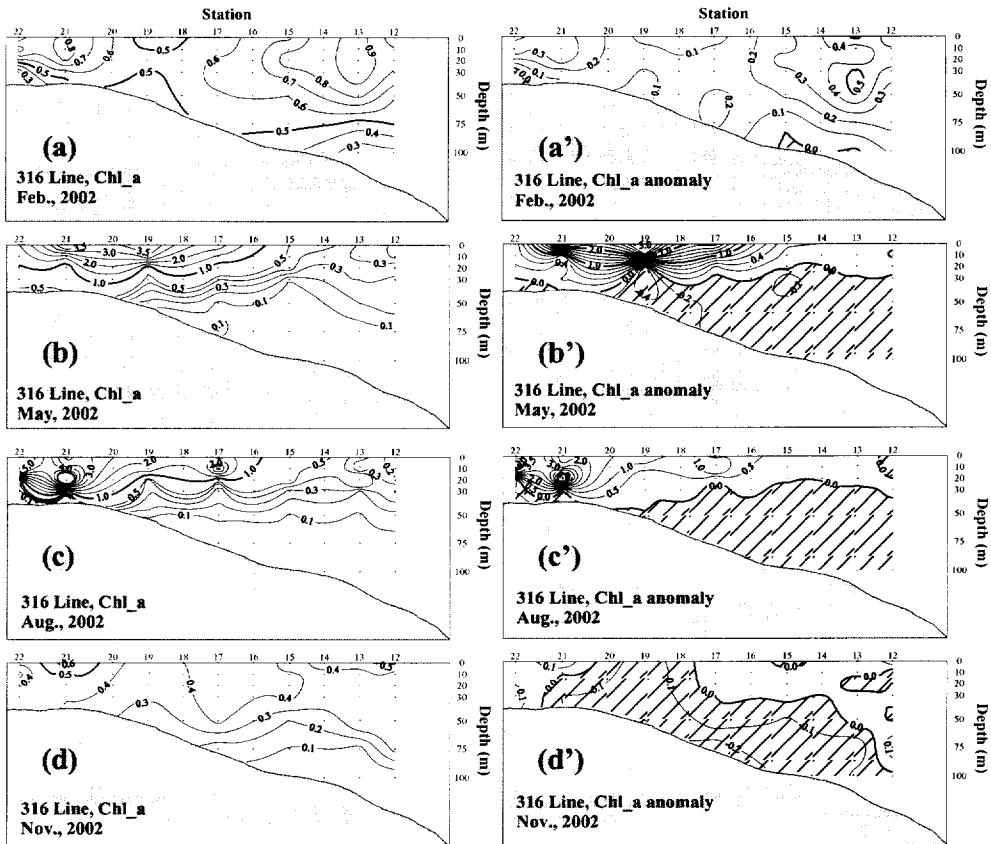
Appen. 2.5. Vertical distributions of measured chlorophyll *a* (mg/m³) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2000.

316 Line, 2001



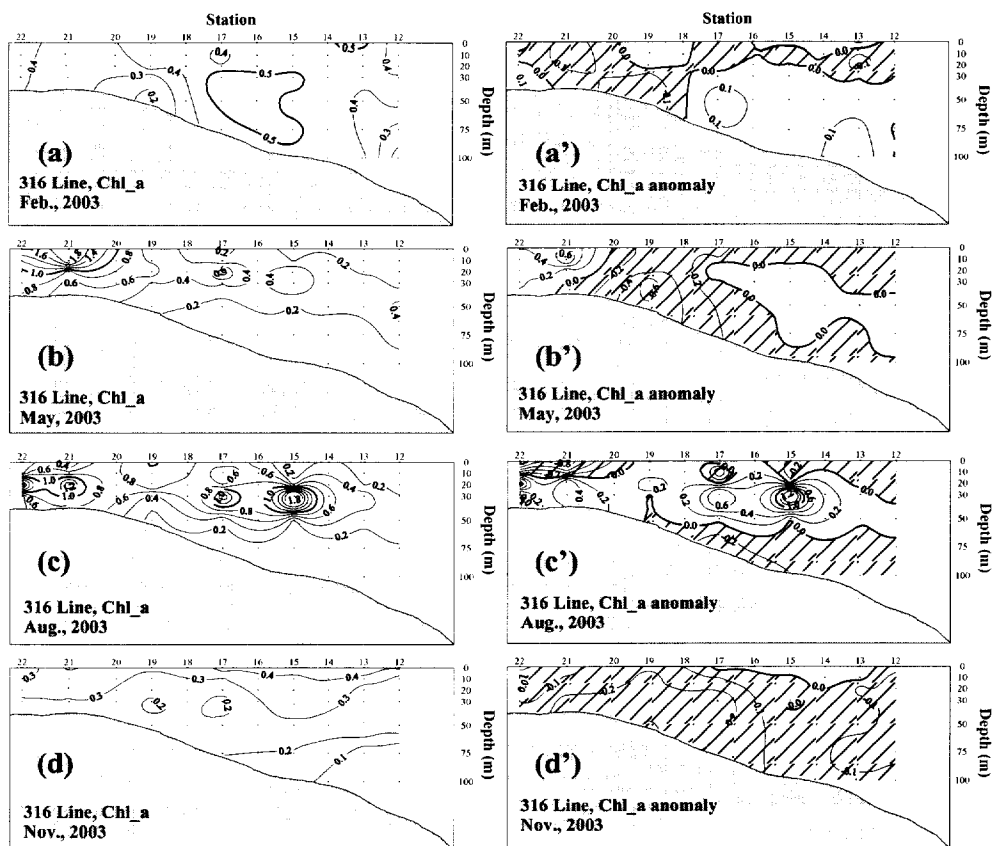
Appen. 2.6. Vertical distributions of measured chlorophyll *a* (mg/m³) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2001.

316 Line, 2002



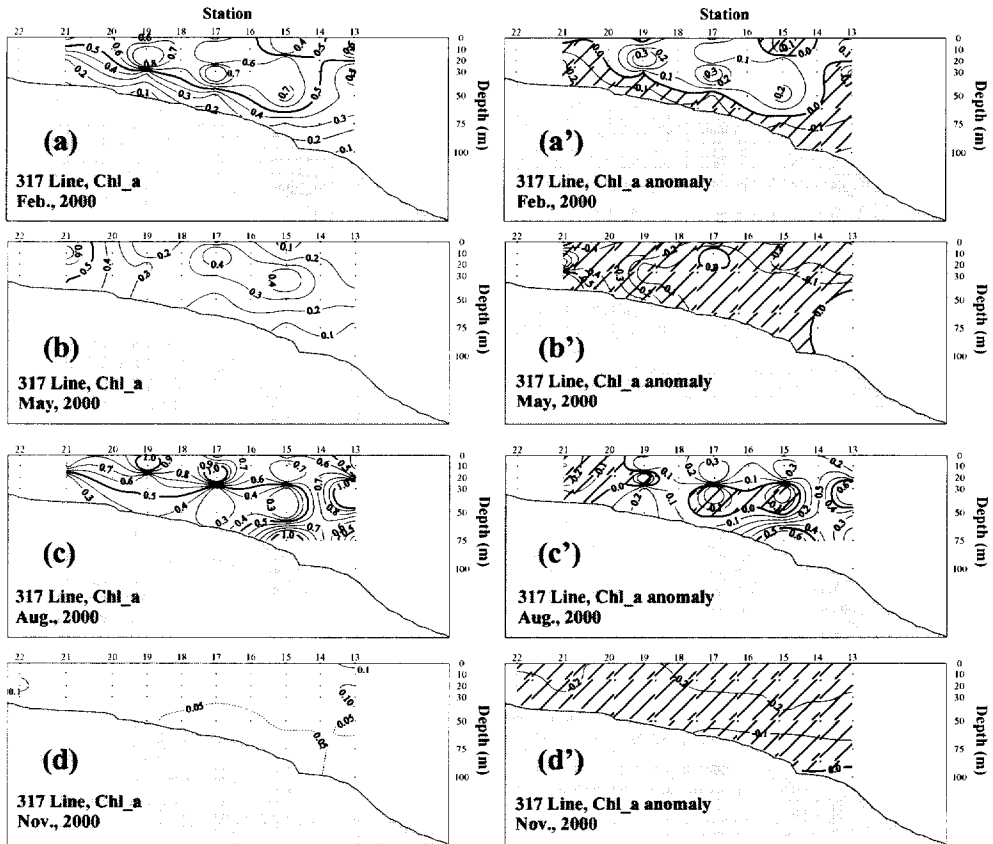
Appen. 2.7. Vertical distributions of measured chlorophyll *a* (mg/m³) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2002.

316 Line, 2003



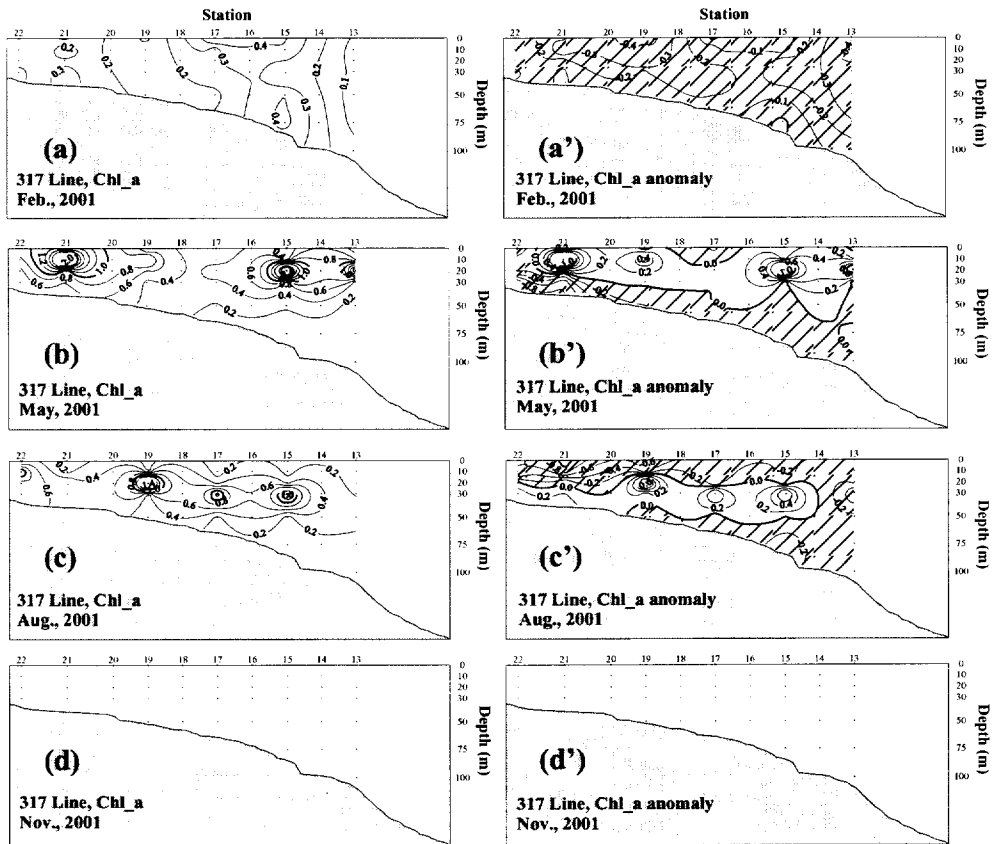
Appen. 2.8. Vertical distributions of measured chlorophyll *a* (mg/m³) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2003.

317 Line, 2000



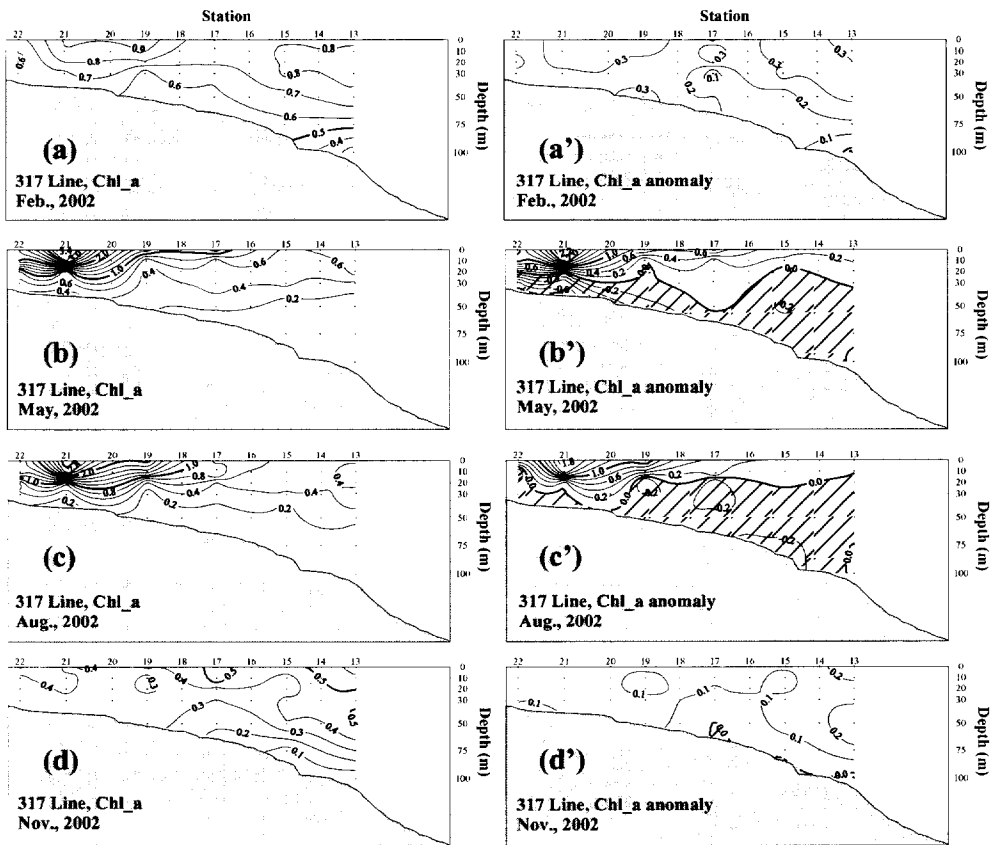
Appen. 2.9. Vertical distributions of measured chlorophyll *a* (mg/m³) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2000.

317 Line, 2001



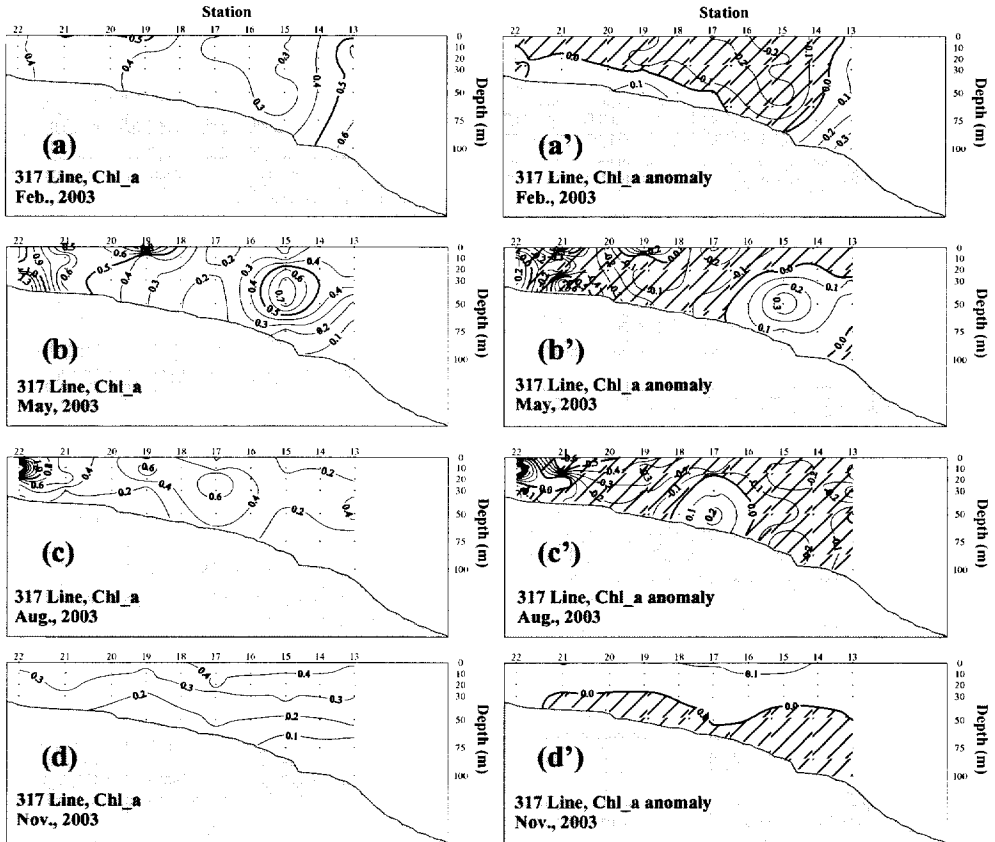
Appen. 2.10. Vertical distributions of measured chlorophyll *a* (mg/m³) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2001.

317 Line, 2002



Appen. 2.11. Vertical distributions of measured chlorophyll *a* (mg/m³) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2002.

317 Line, 2003



Appen. 2.12. Vertical distributions of measured chlorophyll *a* (mg/m³) and their anomalies in February (a), May (b), August (c) and November (d) in 2003.