북극 스발바드섬 콩스피오르덴만의 여름(2006년 8월)기간 해양광학적 특성 연구

문정언[1], 안유환[1], 양찬수[1], 박병권[2]

[1]한국해양연구원 해양위성연구단
경기도 안산시 상록구 사2동 1270번지, E-mail: jemoon@kordi.re.kr

[2]한국해양연구원 부설 극지연구소

Characteristic of in-situ ocean optical data in Kongsfjorden, Svalbard during Arctic summer (August 2006)

Moon Jeong-Eon, Ahn Yu-Hwan, Yang Chan-Su, Park Byong-Kwon

요약

북극 다산기지가 있는 니알슨 인근 해역인 Kongsfjorden만은 일부 해역이 해빙으로 덮혀 있는 반폐쇄적인 만으로 수심이 평균 200m 이상 된다. 이곳 북극 지방은 하절기라도 태양의 고도가 낮아 해색위성분야의 극지활용에 대한 가능성 여부도 명확하게 알려져 있지 못하다. 따라서 본 연구에서는 북극 다산기지가 위치한 스발바드 군도의 니알슨 주변 해역(Kongsfjorden 해역)을 중심으로 2006년 8월 현장관측된 자료들을 유사한 시기의 한반도 주변 해역에서 현장관측된 자료들과 비교/분석하여 해양환경적 특성과 해수광학적인 특성이 어떤 차이가 있는지를 비교 분석하였다. 또한 북극 지방에서 인공위성을 이용한 해색위성자료의 극지활용이 가능한지를 검토하였다. 해수의 광 특성으로, 니알슨 주변 해역의 $a^*_{ph}(440)$ 최대값은 0.1㎡/㎎으로 한반도 주변해수의 $a^*_{ph}(440)$ 최대값보다 약 2배정도 높게 측정되어 플랑크톤의 광 흡수효율이 중위도보다 상대적으로 높은 것으로 분석되었다. $a^*_{ss}(400)$ 값은 0.04-0.1㎡/g으로 동중국해와 유사하며, 한반도 주변해수보다 높은 값을 나타냈다. 이것은 Kongsfjorden 해역의 부유물질(SS) 구성성분이 동중국해와 유사한 무기광물 입자로 주로 구성되어 있음을 보여주고 있다. $a_{dom}(400)$ 값은 0.08-0.25m^{-1}로 한반도 주변해수의 $a_{dom}(400)$ 값과 유사하고 연안해역의 $a_{dom}(400)$ 값보다 낮은 값을 나타냈다. $E_d(460)$의 평균값은 Konsfjorden 해역 40㎽/㎠/㎛, 동중국해 120㎽/㎠/㎛, 황해남부 110㎽/㎠/㎛, 남해연안 100㎽/㎠/㎛, 진해만 100㎽/㎠/㎛이었다. 이와 같은 현장관측결과를 토대로 분석한 북극 다산기지 주변 해역의 해수광학적인 환경 특성은 용존유기물의 흡광도를 기준으로 볼 때 대양(Open

Sea)의 광 특성과 유사하였다. 또한 북극지방에서 태양의 해수 입사 광량은 중위도의 약 40%정도이지만 해색위성자료의 극지활용이 가능하다고 판단되었다.

1. 서론

해색위성을 활용한 극지연구에 있어서 현재 사용되고 있는 해양환경 분석 알고리즘들은 극지 광환경에 대한 특성을 고려하지 않았기 때문에 많은 오류를 산출할 것이다. 특히 해빙이나 빙하가 존재하는 해역에서는 일반 대양과는 다른 해수광 특성을 지니고 있으므로 해색위성에서 얻은 각종 분석자료들의 값에 대한 신뢰도가 많이 떨어진다. 따라서 해색위성자료의 극지 활용을 높이고 자료의 질을 향상하기 위해서는 극지방에서의 해수 광특성조사와 함께 위성자료의 검보정과 극지환경분석용 알고리즘의 개발이 필요하다.

그러나 극지방으로 접근하여 현장관측을 수행하기란 그리 쉽지 않다. 남극에는 한국해양연구원 부설 극지연구소에서 운영하는 세종기지가 있지만 남극대륙으로의 접근이 용이하지 못하다. 그에 비해 북극는 접근이 비교적 용이하며 최근에 한국해양연구원 부설 극지연구소에서 북극 다산기지를 스발바르 군도에 있는 니알슨 북극 기지촌 내에 설치·운영하고 있다.

스발바르(Svalbard) 군도는 '차가운 해변의 땅' 이라는 뜻으로, 9개의 주요 섬으로 구성되며 총 62,049㎢ 면적을 가지고 있다. 그 중 북극 다산기지에 인접한 해역인 콩스피오르덴(Kongsfjorden) 만은 위도가 높지만 온난한 북대서양 해류가 유입되어서 남극에 비해 훨씬 기온이 높으며 특히 하절기에는 북쪽에서 흘러나오는 저온, 저염의 융빙수와 서쪽에서 고온, 고염의 북대서양 해류가 만나면서 생태적으로 특이한 환경을 조성한다. 이와 함께 해수의 광 특성도 일반적인 해양연안 환경과는 다른 특성을 보일 것으로 생각되고 위도가 높기 때문에 해색원격탐사의 활용 가능성도 의심된다. 대부분의 극지 원격탐사는 해빙이나 빙하의 유실과 이동, 분포면적 등을 모니터링하기 위하여 활용되고 있으며, 전지구적인 기후변화와도 밀접한 관련이 있다.

따라서, 본 연구에서는 스발바드 군도의 콩스피오르덴 만을 중심으로 해양환경적이고 해수광학적인 특성을 조사하여 한반도 주변 해역과의 차이점 등을 비교/분석하고 과연 북극 지방에서 인공위성을 이용한 해색위성자료의 극지활용이 가능한지를 알아보고자 한다.

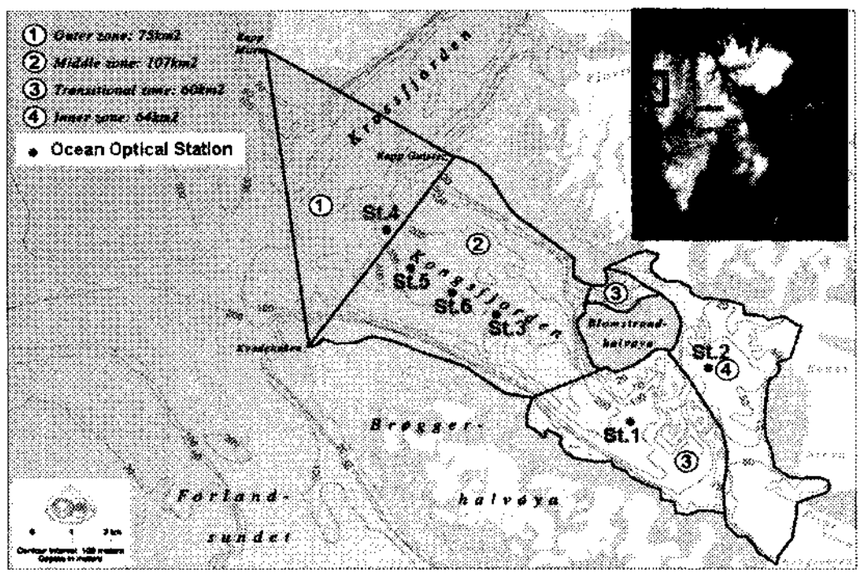

그림1. 스발바드 군도의 콩스피오르덴 만에서 2006년 8월 6일 - 11일 6일동안 현장 관측한 정점도

2. 재료 및 방법

본 연구의 관측해역은 2006년 8월 6일 - 11일 동안에 걸쳐서 북극 다산기지 주변해역인 스발바르(Svalbard)군도의 콩스피오르덴 만에서 현장관측을 실시하였다(그림1). 6일 동안의 관측기간 중 매일

6개 정점에서 해수 채수에 의한 엽록소 농도(chlorophyll concentration, <chl>), 총 부유물질 농도(total suspended solid particles concentration, SS), 식물플랑크톤(phytoplankton), 부유물질, 용존유기물(dissolved organic matter, DOM)에 의한 흡광계수(absorption coefficient, a)와 스펙트로미터(spectroradiometer)에 의한 downwelling irradiance (E_d), water leaving radiance (L_w), sky radiance (L_{sky}), remote sensing reflectance (R_{rs}) 등을 측정하였다.

가. 엽록소 농도

연구해역인 콩스피오르덴 해역에서 직접 채수한 표층 해수를 47㎜ GF/F (Glass Fiber Filter)와 여과시스템을 이용하여 각 관측정점별로 평균 1,000㎖를 여과하였다. 90% 아세톤 10㎖와 여과시 사용된 필터(착색된 필터)를 유리병에 함께 넣고 약 4℃ 냉장상태에서 24시간 보관하였다. 24시간이후에 원심분리기 또는 25㎜ membrane PTFE type syringe filter 등을 사용하여 순수한 아세톤과 엽록소 혼합액을 추출하여 스펙트로포토미터(spectrophotometer)로 파장에 따른 엽록소의 optical density(O.D)를 측정하였다. 사용한 스펙트로포토미터 모델은 Perkin-Elmer사의 Lambda-19 모델이다. Jeffrey and Humphrey(1975)의 식에 의해 엽록소 농도를 산출하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$\langle \mathrm{chl} \rangle (\mathrm{mg/m^3}) = \frac{\mathrm{C} \times v}{\mathrm{V}}$$

$$C = 11.85E_{664} - 1.54E_{647} - 0.08E_{630}$$

여기서, E_λ는 스펙트로포토미터에서 측정된 파장(λ)에 따른 엽록소의 O.D 값이고, v는 90% 아세톤 양(㎖)으로 본 연구에서는 10㎖를 사용하였다. V는 채수한 해수의 여과량으로 단위는 리터(ℓ)이다.

나. 총 부유물 농도

직접 채수한 표층 해수를 25㎜ GF/F와 여과시스템을 이용하여 각 관측정점별로 평균 500㎖를 여과하였다. 여과할 때 사용된 필터의 무게 변화량을 이용하여 총 부유물 농도를 계산하였다.

다. 식물플랑크톤, 부유물질, 용존유기물에 의한 흡광

식물플랑크톤과 부유물질에 의한 흡광계수를 측정하기 위하여 25㎜ GF/F와 여과시스템을 이용하여 채수한 표층 해수를 각 관측정점별로 평균 500㎖를 여과하였다. 스펙트로포토미터로 식물플랑크톤과 부유물질에 대한 O.D를 파장 400 - 750 ㎚까지 스캐닝하였다. 파장에 따른 식물플랑크톤(a_{ph})과 부유물질(a_{ss})의 흡광계수는 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$a_{ph}(\lambda) = \frac{O.D_{ph}(\lambda) \times 2.3025}{\left(\frac{V}{S}\right) \times 2} \times 100 \quad [m^{-1}]$$

$$a_{ss}(\lambda) = \frac{O.D_{ss}(\lambda) \times 2.3025}{\left(\frac{V}{S}\right) \times 2} \times 100 \quad [m^{-1}]$$

여기서, "$\frac{V}{S}$"는 여과한 해수의 양(V ㎖)을 여과할 때 입자에 의하여 필터에 착색된 면적(S ㎠)으로 나누어준 값으로, 이 값은 광행로(optical pathlength)를 대변한다. 광행로란 해수 내에서 광이 통과한 경로를 의미하는 것으로서, 직접적으로 측정하는 것이 불가능하기 때문에 위와 같

은 방법으로 계산하였다. "2"라는 값은 β-effect(Kiefer and SooHo, 1982; optical pathlength 증폭현상)로서, 부유입자 상태에서 측정한 흡광 계수 값과 필터를 이용하여 측정한 흡광 계수 값과의 비 값이다. 일반적으로 필터를 이용하여 측정한 흡광 계수 값이 부유입자 상태에서 측정한 흡광 계수 값보다 약 2배 정도의 큰 값을 갖는다(Ahn, 1990). 이 현상의 원인은 입자가 필터 위에 놓여 있을 때, 필터와 입자간의 상호작용 및 필터의 광분산에 의한 광행로차의 증폭에 기인한다.

용존유기물의 흡광계수 측정은 여과된 해수를 10㎝ optical cell에 넣고 부유상태에서 스펙트로포토미터로 파장 400 - 750㎚까지 스캐닝하여 O.D를 측정하였다. 다음과 같은 식에 의해 측정된 O.D 값을 흡광계수 값으로 변환하였다.

$$a_{dom}(\lambda) = \frac{O.D_{dom}(\lambda) \times 2.3025}{0.1} \; [m^{-1}]$$

라. 식물플랑크톤과 부유물질의 비흡광계수(specific absorption coefficient)

비흡광계수란 단위 농도당 입자의 흡광계수로서, 식물플랑크톤(a^*_{ph})과 부유물질(a^*_{ss})의 비흡광계수는 다음과 같이 계산하였다.

$$a^*_{ph}(\lambda) = \frac{a_{ph}(\lambda)}{\langle chl \rangle} \quad [m^2/mg]$$

$$a^*_{ss}(\lambda) = \frac{a_{ss}(\lambda)}{SS} \quad [m^2/g]$$

마. 스펙트로미터에 의한 해수 광 측정

그림2에 묘사된 것과 같이 ASD사의 듀얼 스펙트로미터를 사용하여 $E_d(0+)$, L_{sky}, L_{wT}(total radiance)를 측정하였다.

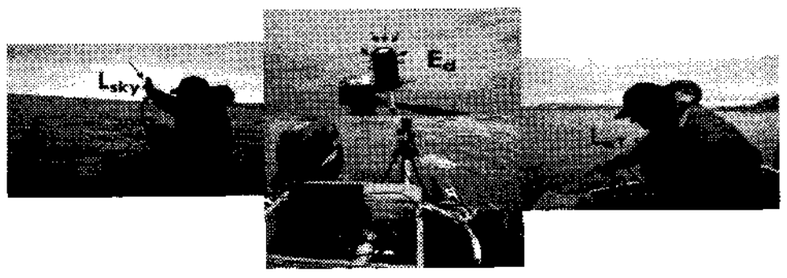

그림2. ASD사의 듀얼 스펙트로미터를 이용하여 선상에서 $E_d(0+)$, L_{sky}, L_{wT}를 측정하는 모습

L_w(water leaving radiance)란 해수표면에 형성된 물과 대기의 경계면을 통과하여 나오는 해수 수괴로부터 반사된 광량이라고 하며, 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$L_w(\lambda) = L_{wT}(\lambda) - \{L_{sky}(\lambda) \times F_r(\lambda,\theta)\}$$

여기서, $F_r(\lambda,\theta)$는 Fresnel reflectance 값으로써, 파장(λ)과 입사각(θ)의 함수이지만 본 연구에서는 파장에 관계없이 입사각이 30°일 때의 값 0.025로 일정하다고 가정하였다.

원격반사도(R_{rs})는 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$R_{rs}(0^+,\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(0^+,\lambda)} [sr^{-1}]$$

3. 연구결과

가. 해양환경 변수(엽록소, 총 부유물 농도, $a_{dom}(400)$)

북극 다산기지 주변 해역인 콩스피오르덴 해역에서 각 정점별 현장관측된 엽록소 농도와 총 부유물 농도, 파장 400㎚에서의 용존유기물 흡광계수 값을 도식화하여 그림3에 나타냈다.

나. 해수 고유의 광특성(IOPs)

북극 다산기지 주변 해역인 콩스피오르

덴 해역에서 각 정점별 현장관측된 식물플랑크톤, 부유물질, 용존유기물의 흡광과 비흡광계수를 파장 400 - 750㎚에 따라 도식화하여 그림4에 나타냈다.

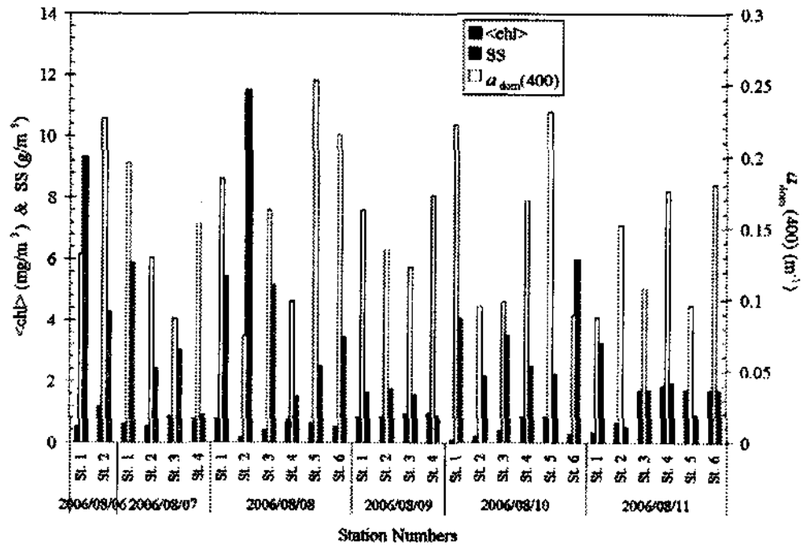

그림3. 2006년 8월 6일 - 11일 북극 스발바드 군도의 콩스피오르덴 해역에서 현장관측한 엽록소와 총 부유물 농도, 파장 400㎚의 용존유기물 흡광계수 값을 도식화하여 나타낸 그림

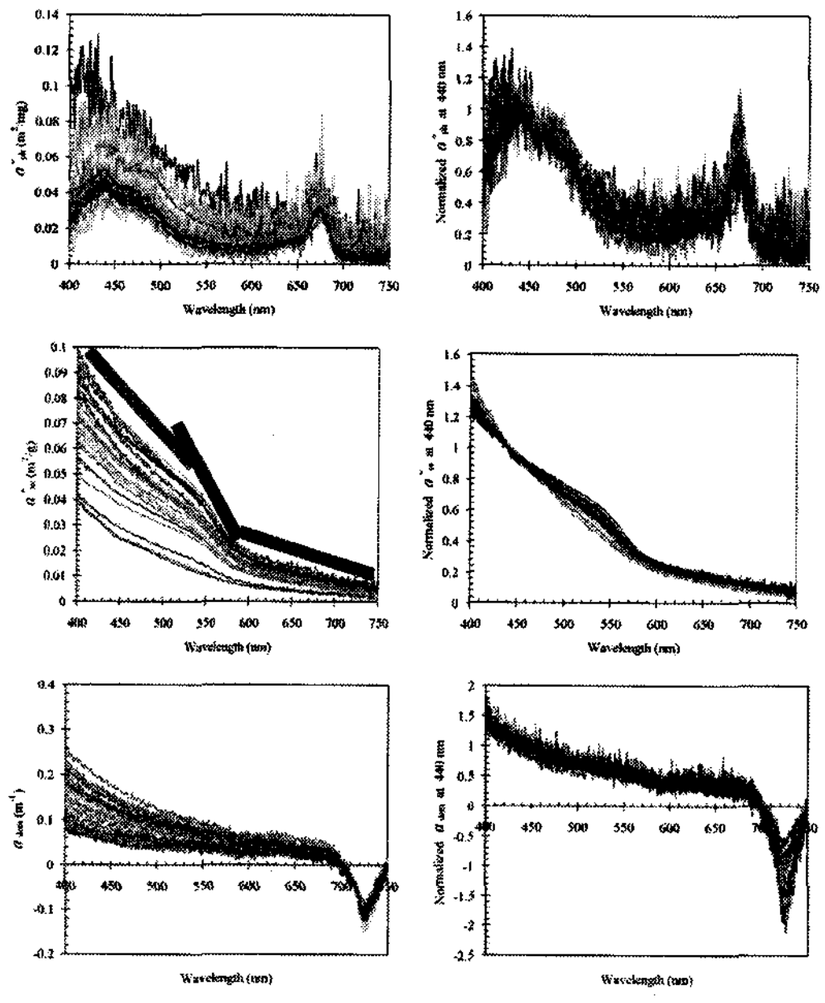

그림4. 2006년 8월 6일 - 11일 북극 스발바드 군도의 콩스피오르덴 해역에서 현장관측된 식물플랑크톤, 부유물질, 용존유기물의 흡수 스펙트럼

다. 해수의 광학적 신호와 원격반사도

북극 다산기지 주변 해역인 콩스피오르덴 해역에서 스펙트로미터를 이용하여 각 정점별 현장관측된 E_d, L_{sky}, L_w, R_{rs}를 파장 400 - 750㎚에 따라 도식화하여 그림5에 나타냈다.

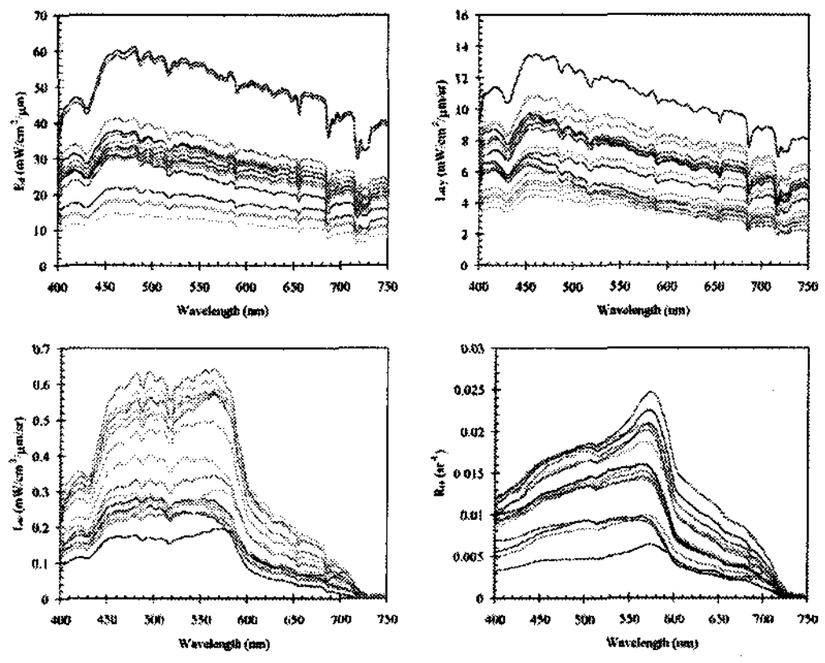

그림5. 2006년 8월 6일 - 11일 북극 스발바드 군도의 콩스피오르덴 해역에서 현장관측된 E_d, L_{sky}, L_w, R_{rs} 스펙트럼

라. 해역별 광특성 비교

그림6은 북극 다산기지 주변 해역인 콩스피오르덴 해역에서 현장관측을 통해 얻은 a^*_{ph}, a^*_{ss}, a_{dom} 스펙트럼과 한반도 주변 해역인 동중국해, 황해남부해역, 남해 연안해역과 진해만에서 현장관측을 통해 얻은 a^*_{ph}, a^*_{ss}, a_{dom} 스펙트럼들을 비교한 그림들이다. 그림에서 적색은 본 연구해역인 콩스피오르덴 해역에서 측정한 자료들이고, 청색은 2003년 8월에 적조발생이 잦은 진해만 해역에서 측정한 자료들이고, 검정색은 2005년 6월 황해남부해역에서 측정한 자료들이고, 주황색은 2005년 11월 남해연안에서 측정한 자료들이고, 녹색은 2006년 8월 동중국해에서 측정한 자료들을 나타내고 있다. 그림7은 북극 다산기지에서 하루동안 1시간 간격으로 태양광의 세기 변화를 관측하여 중위도 지방인 우리나라 거제도 연안에서 측정한

태양광의 세기와 비교한 그림이다.

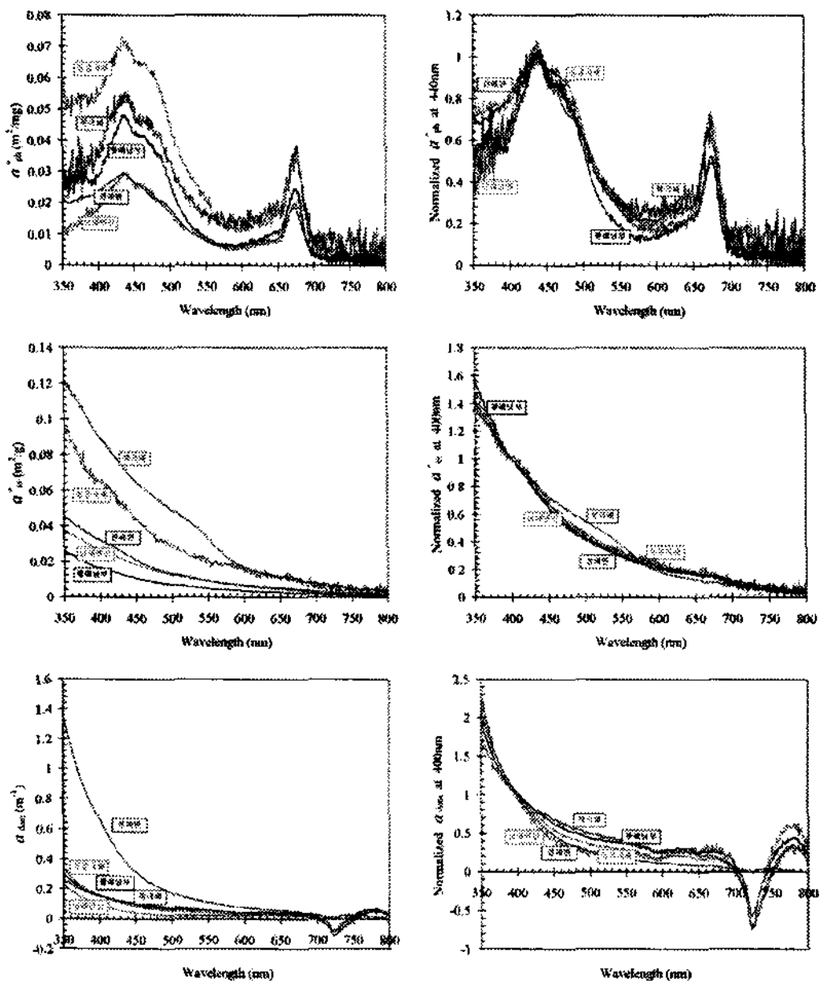

그림6. 북극 스발바드 군도의 콩스피오르덴 해역과 한반도 주변 해역인 동중국해, 황해남부해역, 남해연안, 진해만에서 각각 측정된 a^*_{ph}, a^*_{ss}, a_{dom} 스펙트럼 비교

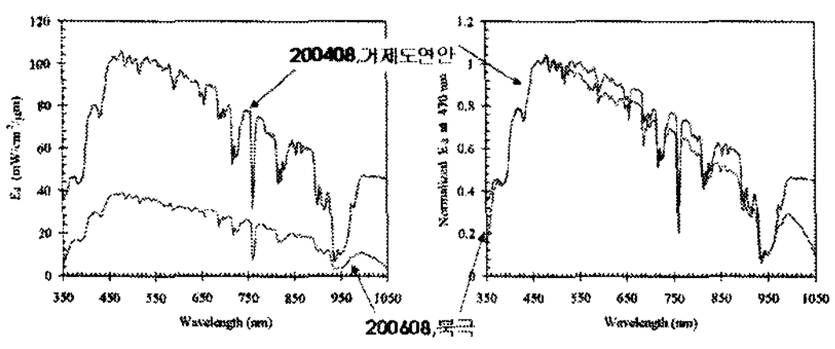

그림7. 북극 스발바드 군도의 콩스피오르덴 해역과 한반도 주변 해역인 거제도 연안해역에서 측정된 E_d 스펙트럼 비교

표1. 해역별 광특성 비교

항목 \ 해역	북극해역 (콩스피오르덴)	동중국해	황해남부	남해연안	진해만
$a^*_{ph}(440)$	0.04 - 0.1	0.04 - 0.1	0.04 - 0.06	0.01 - 0.025	0.018 - 0.042
$a^*_{ss}(400)$	0.04 - 0.1	0.02 - 0.13	0.007 - 0.025	0.02 - 0.035	0.007 - 0.05
$a_{dom}(400)$	0.08 - 0.25	0.09 - 0.28	0.07 - 0.28	0.03 - 0.18	0.5 - 1.0
$E_d(460)$ -avg.	40	120	110	100	100

4. 결론 및 고찰

연구해역인 북극 스발바드 군도의 콩스피오르덴 해역의 $a^*_{ph}(440)$ 최대값은 0.1 ㎡/㎎으로 한반도 주변해수의 $a^*_{ph}(440)$ 최대값보다 약 2배정도 높게 측정되어 플랑크톤의 광 흡수효율이 중위도보다 상대적으로 높은 것으로 분석되었다. 콩스피오르덴 해역의 $a^*_{ss}(400)$ 값은 0.04-0.1㎡/g으로 동중국해와 유사하며, 한반도 주변해수보다 높은 값을 나타냈다. 이것은 콩스피오르덴 해역의 부유물질 구성성분이 동중국해와 유사한 무기광물 입자로 주로 구성되어 있음을 나타내고 있다. 콩스피오르덴 해역의 $a_{dom}(400)$ 값은 0.08-0.25 m^{-1}로 한반도 주변해수의 $a_{dom}(400)$ 값과 유사하고 연안해역의 $a_{dom}(400)$ 값보다 낮은 값을 나타냈다. $E_d(460)$의 평균값은 콩스피오르덴 해역 40㎽/㎠/㎛, 동중국해 120㎽/㎠/㎛, 황해남부 110㎽/㎠/㎛, 남해연안 100㎽/㎠/㎛, 진해만 100㎽/㎠/㎛이었다. 이와 같은 현장관측결과를 토대로 분석한 북극 다산기지 주변 해역인 콩스피오르덴 해역의 해수광학적인 환경특성은 용존유기물의 흡광도를 기준으로 볼 때 대양(Open Sea)의 광 특성과 유사하였다. 또한 북극지방에서 태양의 해수입사 광량은 중위도의 약 40%정도이지만 해색위성자료의 극지활용이 가능하다고 판단되었다.

5. 참고문헌

강성호,김예동,강재신,유규철,윤호일,이원철, 2003. 북극 스발바드섬 Kongsfjorden의 해양 환경 및 식물플랑크톤 모니터링 연구. *Ocean and Polar Research*, Vol.25(2), 211-224.

Jeffrey, S. W. and Humphrey, G. F., 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b and c in higher plants, algea and natural phytoplankton. *Biochemie Physiologie Pflanzen,* 167, 374-384.