

해양원격탐사기술 개발을 위한 해색 분석모델의 개발

Development of an inverse model
for ocean color remote sensing technique

1998. 3

한국해양연구소

제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를 “해양원격탐사기술 개발을 위한 해색 분석모델의 개발”
사업의 최종보고서로 제출합니다.

1998년 3월

연구책임자 : 안유환

요약문

I. 제목 : 해양원격탐사 기술개발을 위한 해색 분석 모델 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

Ocean color 원격탐사란? 해수와 접촉 없이, 원격 감지된 해수색으로부터 해수내에 포함된 주요성분 물질(식물성 플랑크톤, 부유 유.무기물, 용해 유기물, 무색의 플랑크톤 등)을 분석해 낼 수 있는 기술을 말한다. 이 해색 원격탐사는 해양원격탐사 가운데서 가장 다양한 기능을 가진 원격탐사로 연안 해양환경감시, 해양 탁도, 일차생산량의 조사 등에 활용될 수 있으며 나아가 지구 장기기후변화, CO₂ 순환에 이르기까지 다양한 tool로써 이용되고 있다.

그러나 현재까지 개발된 분석기술(알고리즘)은 경험적인 방법으로 연안의 다양한 해양환경에는 적용할 수 없는 문제점을 갖고 있다. 그러므로 보다 과학적이고 분석적인 해색원격탐사 기술을 위하여서는 먼저 해색에 영향을 미치는 해양의 생물입자 및 무기 부유입자들의 광학적(역산란 및 흡수)인 특성이 연구되어야 하며, 그리고 해수의 반사도로부터 해수에 존재하는 물질량을 역으로 분석하는 알고리즘이 개발되어야 함.

이러한 순수 분석적인 방법의 모델은 해색 원격탐사의 기술은 보다 한 차원 높은 단계로 발전시키기 위한 필수적인 과정으로, 아직까지는 선진국에서도 연구된바가 없는 첨단기술로, 본 연구에서 처음으로 시도하여 해양원격탐사의 선진화에 기여하고자 함.

III 연구개발의 내용 및 범위

1. 식물성플랑크톤의 광 역산란 특성연구
2. 해양 부유 박테리아 및 동물성플랑크톤의 광특성 연구
3. 부유 무기입자의 광학적 특성연구
4. 해색으로부터 역으로 해양의 물질농도 분석모델의 개발

IV 연구 개발의 결과 및 활용에 관한 건의

1. 해양에서 해색 변화에 영향을 미칠 수 있는 식물성 플랑크톤, 박테리아, 부유 무기입자 등의 비 역산관계수와 비 흡광계수 관한 결과를 얻었다. (이들 물질의 광학적 특성은 본문을 참조하기 바람)

2. 이들 개개의 광특성을 이용하여 해색분석 모델의 입력자료로 활용이 되었다. 분석자료는 spectro-irradiance meter를 사용하여 관측된 해수의 반사도로부터 역으로 4개의 성분을 분석할 수 있는 4C 모델을 개발하였다. 적용대상 해역은 빈 영양해에서부터, 부영양해, 아주탁한 해수까지 적용되었다.

3. 현장관측 값과 모델의 분석 값이 서로 비교되었다. 대체로 만족할 만한 결과를 얻었다. 반면에 해수의 성격에 따라 오차가 증가하는 성분이 있으나 가장 주요한 클로로필 농도와 부유 유기물인 경우는 해수의 type에 관계없이 신뢰도 높은 결과가 얻어졌다. 모델의 결과에서 가장 안정적이지 못한 항목은 Bacteria를 포함한 무색의 마이크로 동물 플랑크톤으로 밝혀졌다.

4. 상기 모델은 air-borne을 활용한 원격탐사 시스템에는 당장 적용 가능하며, 위성에 적용되기 위하여서는 (현재의 5 - 8개 bands에서) 최소한 20여개 이상의 band가 필요하다. 최근의 위성 동향은 최대 200개까지 band를 갖는 hyperspectral satellite 쪽으로 급격히 발전되고 있어 머지 않아 이러한 분석 모델이 적용될 수 있으리라 사료됨.

5. 제안

여기서 연구된 내용은 아직은 완벽한 개발이 아니다. 입자 해양광학에 관한 기본연구와 반사도 모델의 개량이 요구되고있다. 그러나 이 연구는 Ocean color remote sensing 기술을 개발 연구하려는 사람에게 접근방법, 다양한 연구방향 및 주제가 무엇인지를 알려주는 기본 참고문헌으로 활용할 수 있다. 동시에 이 기술은 국외에서도 이제 막 시도하고 있는 첨단기술로 하루빨리 미진한 부분이 다시 연구될 수 있기를 기대한다.

ABSTRACT

I. Title

Development of an inverse model for ocean color remote sensing technique.

II. Objective and Significances

Ocean color remote sensing is one technique of extracting contents for concentrations of phytoplankton, suspended mineral particles, dissolved organic matter, uncolored heterotrophic micro plankton, etc. from remotely sensed water leaving radiance. This technique can be applied to coastal environmental monitoring including turbidity, primary production, red tide, oil spill etc. These can be also used for researches related to climatic change and global carbon cycle.

In the past, developed algorithms have been based on the empirical relationship between *in-situ* values and normalized upwelling radiances in two or three bands of wavelengths. So the algorithms in use have some problems when those are applied to coastal area where optical properties of seawater vary strongly. To overcome the problems, it is necessary to know optical properties of all kind of particles (for example, the specific absorption and backscattering coefficient) that can change ocean color. A model is developed to inversely extract the contents of seawater from the ocean reflectance measured by spectroradiometer. The inverse model here is the first pure analytical one in the world. It's known the analytical method is indispensable to develop one step more higher level in the remote sensing technique.

III. The items investigated are followings.

1. backscattering properties of phytoplankton,
2. optical properties of bacteria and heterotrophic microorganism,
3. optical properties of suspended mineral particles, and
4. development of an inverse model from ocean reflectance.

IV. Results of the studies and suggestions

1. Specific backscattering and absorption coefficients were obtained for phytoplankton, bacteria, suspended particles, etc., which can influence on ocean color (see the text for the details).

2. A 4C model was developed, which can analyze four components of water using ocean reflectance measured by spectroradiance meter. The optical properties are inputted in the 4C model. The model was tested in the various types of seawater; oligo- and eu-trophic waters and turbid water.

3. Model results are in good agreement with *in-situ* values though some errors were found when the model was applied to heterotrophic organism cell density. We could get reasonable solutions for concentration of chlorophyll and the suspended particles.

4. This model can be utilized in the air-borne remote sensing system for the primary production and turbidity water. To utilize this technique in satellite image processing, multi spectroradiometer needs to have twenty bands at least. Recently, the hyperspectral spectroradiometer with maximum 200 bands is under development. In the near future we hope this model could be valuable tool for ocean color remote sensing techniques.

5. Suggestions

The outcome of this research could be treated as a building block for improving the ocean color remote sensing technique. For more ideal model, we need still more precise informations about the optical properties of particles. Some additional factors not included in this study need to be considered to make advance for the ocean color remote sensing technique.

목 차

제1장 서론	1
제2장 연구방법	3
2.1 연구방향	3
2.2 Ocean color에 영향을 미치는 물질	3
2.3 모델의 분석대상 물질	6
2.4 현장 부유입자의 광특성 측정의 문제	6
제3장 해수입자의 광특성 연구	9
3.1 분석 대상입자의 선정	9
3.2 부유생물의 배양 및 무기입자 시료 준비	9
3.2.1 식물성 플랑크톤	9
3.2.2 해양 박테리아	10
3.2.3 Flagellate & Cillate	10
3.2.4 무기 입자	11
3.3 입자의 비 흡수 및 역산란 계수 측정	12
3.3.1 입자의 Size 분포 측정	12
3.3.2 입자의 농도 측정	12
3.3.3 흡수 및 소산계수의 측정	12
3.3.4 부분 역산란계수의 측정	13
3.4 역산란계수 측정을 위한 광학적 Model	15
3.4.1 광 흡수 및 산란의 효율인자 계산	17
3.4.2 Van de Hulst 이론에 의한 Q factor	17
3.4.3 입자의 흡수지수 n' 의 계산	18
3.4.4 상대 굴절지수 n 의 계산	19
3.4.5 Mie 이론에 의한 $\beta(\theta)$ 와 Q_{bb}	22
3.4.6 Optical cell의 기하학적인 보정계수(G.F)	23

3.5 광학적 특성 결과 및 토의	25
3.5.1 해수의 광학적 특성	25
3.5.2 식물성 플랑크톤	27
3.5.3 무색의 종속영양생물(heterotrophe)	29
3.5.4 무기 부유입자	32
3.5.4.1 무기입자의 비 흡광계수	33
3.5.4.2 무기입자의 비 역산란계수	33
3.5.5 용해 유기물	35
제4장 해색분석 모델 개발	36
4.1 서론	36
4.2 해색 현장 관측	36
4.3 기본 이론	38
4.4 반사도 역에 의한 모델의 구성과 해(solutions)	40
4.4.1 Matrix에 의한 일차 선형방정식의 해	42
4.4.2 한 해가 다른 한 해의 종속인 경우: 강제조건에 의한 해	43
제5장 결과 및 토의	45
5.1 해수반사도 현장 측정	45
5.2 Model에 의한 해색 분석결과	45
5.2.1 Oligotrophic water	47
5.2.2 Eutrophic water	48
5.2.3 Turbid water	48
5.3 기존 Model과 비교	50
제6장 결론	53
참고문헌	54
부록	62

CONTENTS

Chapter I . Introduction	1
Chapter II . Material and methods	3
2.1 Study direction	3
2.2 Matters influencing on ocean color	3
2.3 4 Components in the model	6
2.4 Problems in measuring optical properties	6
Chapter III. Optical research of particles in seawater	9
3.1 Selection of the matters in the model	9
3.2 Sample preparation	9
3.2.1 Phytoplankton	9
3.2.2 Marine bacteria	10
3.2.3 Flagellate & Cillate	10
3.2.4 Suspended mineral particles	11
3.3 Measurement of the specific absorption and backscattering	12
3.3.1 Size distribution	12
3.3.2 Particle concentration	12
3.3.3 Absorption and attenuation	12
3.3.4 Partial backscattering	13
3.4 Modeling for backscattering measurement	15
3.4.1 Factor efficiency for absorption and scattering	17
3.4.2 Q factors by Van de Hulst theory	17
3.4.3 Computing of absorption index n'	18
3.4.4 Computing of refractive index n	19
3.4.5 $\beta(\theta)$ and Q_{bb} by Mie theory	22
3.4.6 Geometrical correction of optical cell	23

3.5 Results and discussion on the optical properties of particles	25
3.5.1 Seawater	25
3.5.2 Phytoplankton	27
3.5.3 Heterotrophe	29
3.5.4 Suspended solid particles	32
3.5.4.1 Specific absorption coefficient	33
3.5.4.2 Specific backscattering coefficient	33
3.5.5 Dissolved organic matter	35
 Chapter IV. Inversion problem of ocean reflectance	 36
4.1 Introduction	36
4.2 Ocean color measurements	36
4.3 Basic theory	38
4.4 Construction of model and solutions	40
4.4.1 Matrix solution to the linear inverse problem	42
4.4.2 Solution by constraint condition	43
 Chapter V. Results and Discussion	 45
5.1 Ocean reflectance	45
5.2 Results of ocean reflectance model	45
5.2.1 Oligotrophic water	47
5.2.2 Eutrophic water	48
5.2.3 Turbid water	48
5.3 Comparison with the existing model	50
 Chapter VI. Conclusion	 53
 References	 54
 Appendix	 62

서론 (Introduction)

1978년 10월 궤도에 올려진 해색(Ocean Color)위성 Nimbus-7은 우리에게 처음으로 지구적인 규모의 해양 1차 생산자들의 시공간적인 분포를 보여주었다. 이와 같이 해색에 의한 해양 remote sensing 기술은 국부적으로는 수산자원 탐사, 해양 환경오염 조사, 적조감시 등에 이용되고 있으며, global scale로써는 지화학 Cycle, 육상 및 해수에서의 일차 생산성 그리고 지구 환경 변화의 연구에 이르기까지 필요 불가결한 새로운 기술로써 각광을 받고 있다고 생각된다.

본 연구는 많은 해양 remote sensing 분야 가운데서 Ocean color remote sensing 분야로써, 수중에 있는 생물적 입자(plankton)의 량과 무기입자량을, 배, 항공기 또는 위성으로부터 측정된 해수 색(반사도 스펙트럼) 분석에 의하여 이들의 양을 추출 해내기 위해서 연구되어졌다. 현재 이 해색 원격탐사 기술은 가시광 영역의 해수로부터 반사되어 나오는 몇 개의 해수색 신호(443, 520, 550, 670 및 750nm)로부터 물질량 추출 알고리즘이 개발되었다.

Morel & Gordon(1980)은 해수의 반사광으로부터 해수 중에 포함된 물질의 양적인 remote sensing을 위하여 3가지의 접근 방식을 제시하였다. 즉, 2 - 3개의 특정 파장(440, 550, 670 nm)에서의 측정된 해수 광량과 현장 측정된 물질량과 통계적인 상관 관계로써 얻어지는 경험적인 방법과, 2번째 반 분석적인 방법 혹은 반 경험적 방법으로 해수 내에서 이론적인 복사선 전달의 해와 경험적인 내용의 조합으로 Algorithm이 얻어진다고(Morel, 1988; Gordon *et al.* 1988). 이들 2 방법은, 육지기원 입자들의 영향을 받지 않는 원 해양 CASE-I waters(Morel and Prieur, 1977)에서만 적용이 가능하나, 침전 입자의 재 부상으로 물덩이의 광학적인 특성에 쉽게 영향을 미치는 천해양, 혹은 바람이나 강물에 의해 육지의 영향을 받는 연안지역 해수(CASE-II waters)인 경우 그 결과는 신빙성을 잃어버린다.

3번째로, 본 연구의 주제인 remote sensing의 방법은, 어떠한 해수의 type에도 관계치 않으면서 분석이 가능한 새로운 방식으로, 해수 색깔이 수

중에 들어있는 입자들의 양질적인 분포에 따라 변하는 것을 기본 원리로 하고 있다. 다시 말하여, 수중에 존재하는 모든 종의 입자들이 수색을 어떻게 변화시키는가 (광학적인 특성)를 알고 있다면, 이들 입자들의 농도의 역 추정(Inverse problem)이 가능하다. 이 방법을 분석적인 방법이라 부르며, 가장 이상적인 방법이긴 하나 아직 개발이 되지 않았다. 그 이유는 지금까지 해수 중 입자의 광학적인 연구의 어려움, 그리고 실제 위성에는 보다 많은 band를 가진 sensor를 부착하는데 따른 방대한 위성자료의 처리문제를 비롯한 여러 가지 실질적인 문제가 있기 때문이다.

이러한 실질적인 문제는 앞으로 data 압축 및 저장기술이 하루가 다르게 발전하고 있으므로 조만간 해결될 것으로 보고 있다. 그리고 선진국에서는 이미 200개 이상의 band를 가진 Hypersectral 위성개발이 진행 중에 있으며 보다 정밀한 해수신호를 얻는 기술이 발전되고 있어 분석적인 방법의 사용은 멀지 않은 미래에 실용화 될 것으로 사료된다.

그러므로 본 연구에서는 해수 중 물질들의 광특성 연구의 문제점들이 무엇이며, 해수 중 물질들의 무엇을 어떻게 연구할 것인가? 그리고 얻어진 결과로부터 어떻게 remote sensing 기술에 응용할 것인가?를 연구하였다. 본 연구보고서는 연구자의 학위논문(Ahn, 1990)을 개선한 것임을 밝혀둔다.

2.1 연구방향

해수 내에 있는 물질 가운데 Ocean color에 영향을 끼칠 수 있는 물질을 중심으로 먼저 광학적인 특성 연구를 수행하였다. 광학적인 특성 가운데 가장 중요한 것은 물질에 따른 흡수 스펙트럼과 역 산란특성이다. 해당 입자는 주로 생물적인 입자와 무기 부유입자로 분류할 수 있다. 이중에서도 가장 중요한 것은 식물성플랑크톤의 광 흡수와 역산란 특성이며 이어서 부유 무기입자이다. 식물성 플랑크톤의 흡수광특성은 많은 연구가 있었으나 역산란 특성은 거의 없었다. 그러므로 본 연구의 많은 부분이 역산란 광특성을 연구하는데 중점이 주어질 것이다.

그리고 분석대상의 물질을 무엇으로 할 것인지? 이들 물질에 의하여 해석은 어떤 방식으로 영향을 미치는지에 관한 문제는 해수 중에 투입된 한 광자의 운명에 관한 문제로, 최종 결과는 여러 가지 모델이 있으나 여기서는 Morel & Prieur(1977)의 모델을 사용하였다.

문제의 해결은 모델을 일차 선형방정식으로 변경하고, Matrix에 의한 최소자승법으로 최적의 해를 얻게된다. 그리고 일차선형의 관계가 성립되지 않는 경우는 반복적인 방법으로 해를 얻게될 것이다.

2.2 Ocean color에 영향을 미치는 물질

해수의 광특성에 영향을 미친다는 말은 다시 말하여 해수의 색깔에 영향을 줄 수 있는 물질을 말한다. 이 해수의 색깔은 해수중 물질의 종류와 농도에 따라 대단히 민감하게 변하게 된다. 해수 중에는 최소입자 0.05의 μm Virus 크기에서부터 수십 m의 대형생물까지 존재한다. 그러나 대부분이 0.2 μm 에서 100 μm 범위 내의 생체량이 총 생체량의 95 %이상으로 알려지고 있다 (Sieburth J. McN, 1983). 아래의 표는 100 μm 이하에서 해수의 광 특성을 변화시킬 수 있는 물질들을 분류하여 보았다.

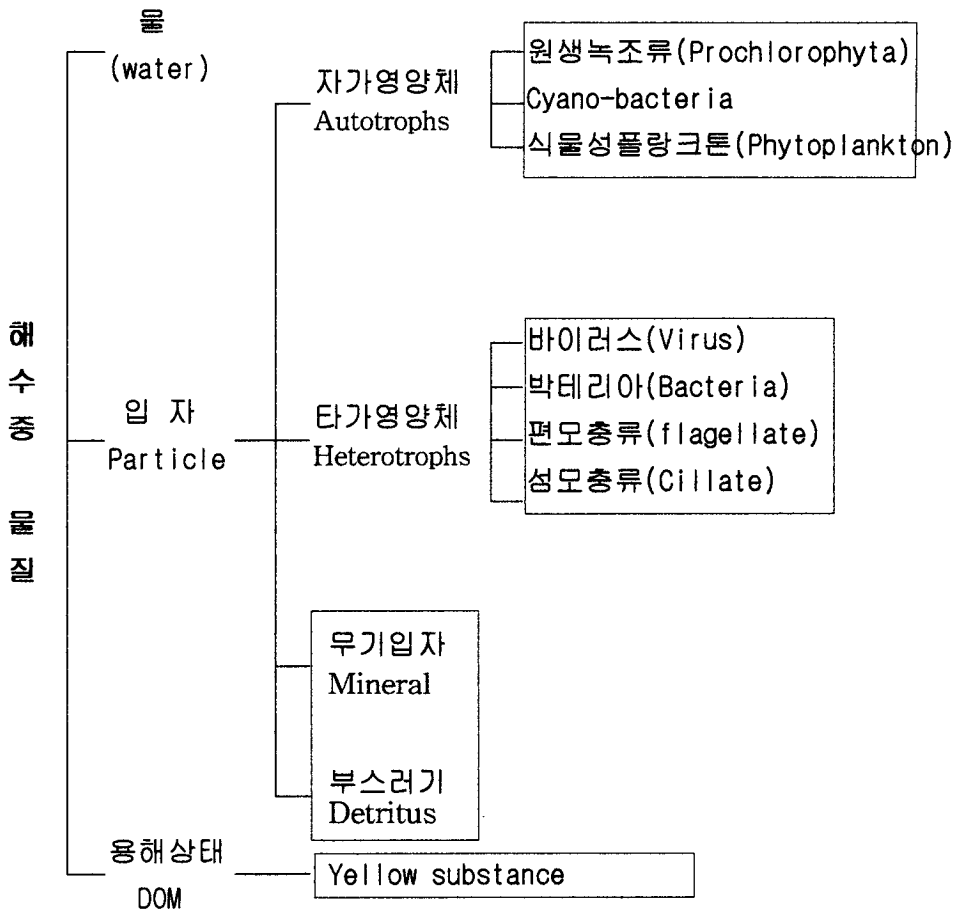


Fig. 1. Matters influencing on ocean color change.

지금까지 광학적으로 연구된 해수중의 물질은 주로 autotrophs (phytoplankton)와 용해 상태의 물질, 즉 yellow substance (Bricaud *et al*, 1981)에 한정되어 있으며 그 외 입자들의 연구는 전무한 실정이다 비록 식물성 플랑크톤이라도 이들의 역 산란에 관한 연구는 거의 되지 않았다. 그러므로 아직 연구되지 못한 입자들의 광 특성 연구가 선행되어야 할 것이다 (해수 그자신의 광학적 특성은 이미 잘 알려져 있음; Morel, 1966, 1974).

해수에서 이들의 광학적 역할은 제각기 다르다. 식물성 플랑크톤은 400 - 500 nm에서 광합성 색소 chlorophyll 및 carotenoids에 의하여 빛이 흡수되며 680nm에서는 chlorophyll-a에 의하여 빛을 흡수한다. 단파장에서 흡수된 일부의 광은 다시 준 적외선 영역의 685nm에서 형광으로 재 방출하기도 한다. 이와 같은 흡수 spectrum으로 인하여 autotrophs는 해수의 색깔을 푸른색에서 녹색으로 변하게 하는 주범인 동시에, 가끔 550nm에서 광을 흡수하는 종이 일시에 번성하여 해수의 색깔이 붉은색을 띠게 되는 적조현상을 일으키기도 한다(Holmes *et al.*, 1967). 어쨌든 이들 식물성 플랑크톤은 해양에서 광흡수 물질의 주인자이며 Ocean Color Remote Sensing에서 가장 흥미 있는 연구의 대상이기도 하다.

지금까지는 타가(중속)영양체의 해수중 광학적 역할은 무시하여 왔다. 그 이유는 미생물 생체량 중에서 이들이 점유하는 생태학적인 연구부족과, 광학적인 연구가 전혀 되지 않았기 때문이다. 그러나 최근의 Morel & Ahn(1991) 의하면 이들이 해수 내에서의 광학적 역할을 무시할 수 없다는 연구 결과가 발표되었다. 물론 이들은 세포내 광합성 색소를 갖지 않으므로 광흡수는 거의 무시할 수 있다고 사료된다. 그중 Bacteria는 역산란에서는 식물성 플랑크톤보다 더 큰 기여를 하는 것으로 밝혀졌다(Morel and Ahn, 1990).

해수중 무기입자는 대부분이 육지기원이며 "tripton"이라 부른다. 이들은 상당한 량의 광을 흡수도 하지만 아주 높은 굴절지수로 인하여 해수의 광(역)산란에 결정적인 역할을 하여, 500-600 nm 파장에서 해수의 반사도를 증가시켜 시각적인 탁도를 높이는 효과를 갖고 온다(Ahn, 1990). 이 무기입자의 광흡수 spectrum은 해수중의 Non living 생물입자의 그것과 상당히 닮은 특성을 나타내고 있다(Ahn, Unpublished). 이 사실은 OCRS에서 이들 두 입자류를 한 성분으로 취급할 수 있음을 의미하기도 한다.

최근 Koike *et al.*(1990)는 해수 중에서 0.3 μ m - 1 μ m 사이의 입자를 "Sub-micrometre particles"이라 하여 이들 중 95%이상이 생물기원의 "non living"의 유기물 입자로 구성되어 있으며, 이들이 해양에서 지화학·생물적 그리고 광학적 역할의 중요성을 강조하였다. Ahn(1990)는 해양서의 총 역산란계수의 추정에서 개개성분의 역산란계수의 합이 총 역산란계수에 크게 미치지 못함을 발견하고 이 "missing part"의 역산란계수가 0.4 μ m이하의 생물 및 무기입자로 구성된 "non living" 입자일 것이라고 예측하였으며, 이론적인 계산에 의하여 Morel & Ahn(1991)는 이 결손 부분의 역

산란계수는 0.1 - 0.4 μm 사이의 입자에 의한 것임을 밝혔다.

Yellow substance(Gilvin)는 일명 'humic substance', 'gelbstoff' 혹은 'humic & fulvic acid'로 불리며 식물의 조직이 토양이나 물속에서 미생물 작용에 의하여 분해되는 과정에서 만들어지는 복합 중합체 용해유기물이다. 광학적 특성은 일반적으로 단파장으로 갈수록 흡수가 크게 증가하는 경향을 나타낸다. 물론 이것은 입자가 아니므로 광 (역)산란에는 전혀 영향을 미치지 않지만, 육수에서 수색이 황색을 띠게 하며 농도가 높은 경우에는 코카콜라 색으로 변하게 하는 주범이다. 일반적으로 이들의 양은 자연의 늪이나 호수에서는 충분히 감지할 수 있는 양이 존재하며 수질오염의 한 지표로서 이용되기도 한다. 양적인 표현은 육수에서는 440nm, 해수에서는 350nm에서 흡광계수로 표현한다.

2.3 모델의 분석대상 물질

현재까지 Ocean Color Remote Sensing에서는 일반적으로 "2 Component model"로, 광합성 색소를 갖는 플랑크톤과 광합성 색소를 갖지 않는 입자로만 구분하고 있다. 본 연구에서는 "4 Component"로써 흡수 spectrum의 모양이 비슷한 무기입자와 모든 부스러기를 같은 group으로 하고 타가 생물 영양체(박테리아, 섬모 및 편모충류)들을 하나의 그룹으로 묶어서 독립된 한 성분으로 좀 더 세분하였다(그림 1 참조). 그리고 용해유기물질 (DOM)을 분석대상 물질로 추가하여 모두 4개 성분으로 다음과 같다.

- 1) 광합성 색소를 갖는 플랑크톤
- 2) 클로로필 색소를 갖지 않는 모든 non-living 입자
- 3) 무색의 Bacteria 및 동물성 플랑크톤의 생물입자(size 10 μm 이하)
- 4) 용해유기물(Dissolved Organic Matter)

2.4 현장 부유입자의 광특성 측정의 문제

해수 중 물질(입자, 혹은 용해물질)들의 흡광 계수는 spectrophotometer 내에서 일반적으로 부유 상태로 측정할 수 있다. 그러나 실제 현장 광 흡수 계수의 측정은 현재까지는 완전한 방법이 개발되지 않고 있다. 그 이유는

첫째, 해수입자의 농도가 아주 높은 특별한 경우를 제외하고 직접 측정하기는 너무 농도가 낮기 때문이다. 거르기(Kirk, 1980)나 원심분리기를 사용(Bannister, 1986; Osbone, 1986)하여 입자농도를 높일 수 있으나 이러한 방법은 작업 도중 미생물 세포의 파괴, 입자들의 재결합 등으로 원래의 입자 광특성을 잃어버리거나 혹은 미세 입자들이 필터를 빠져나가는 유실현상 때문에 적용하기가 어려운 방법이다. 그 외에도 spectrophotometer의 구조상, 용액이 아닌 광 산란이 있는 입자 sample에 대한 오류의 발생이 가장 큰 근본 문제점으로 지적될 수 있다(Ahn, 1987).

둘째, 해수 중에서 한 성분물질의 흡수계수를 따로 분리하여 측정한다는 것은 상당히 많은 문제점을 갖고 있다. 그 이유는 해수입자 성분 중에서 한 가지 성분만을 순수하게 분리 할 수 없기 때문이다.

입자에 의한 흡수의 경우 최근 위 2가지 문제점을 동시에 해결하는 기술이 개발되어 많은 해양학자들이 애용하는 방법이 있다. 이는 Yentsch(1962)가 Shibata(1954)의 “Opal technique” 변형된 방법을 채택한 것을 Kiefer & SooHo(1982)가 해수중의 입자에 의한 흡수계수를 측정하기 위하여 재 도입하여 사용한 후부터 본격적으로 사용되었다. 이 “filter technique”은 해수중 입자를 유리섬유 필터(GF/F)에 거르고 이 필터를 직접 spectrophotometer의 광전관 가까이에 부착하여 흡수 spectrum을 측정하는 방법이다. 이 기술은 입자들이 필터의 표면에 농축되어 있으므로 아주 우수하고 선명한 흡수 spectrum을 제공해 준다.

Kishino *et al.*(1985)는 이 방법을 더욱 발전시켜 chlorophyll 색소를 가진 입자와 가지지 않는 입자로 구분하여 측정할 수 있도록 더욱 개발하였었다. 이 filter technique는 간편, 편리, 신속하여 널리 애용하고 있는 방법이지만 하나 한가지 큰 문제점을 갖고있다. 즉 얻어지는 흡수계수는 부유상태로 측정되는 방법보다 그 값이 1.5 - 3 배정도 높은 값을 준다. 이 증폭되는 값을 흔히들 “ β -factor”(Kiefer & SooHo, 1982)라고 부르는데, 이 β 의 값이 입자의 종류에 따라 다양한 값을 나타내므로 이 방법의 어려움이 있다(Ahn, 1990). 연구자에 따라 흡광계수의 함수로 2 - 2.5(Bricuad & Stramski, 1990) 채택하여 사용하고 있으나, Ahn(1990)은 β 의 원인규명과 해수 입자들의 연구결과에서 β 의 값을 “2”를 사용하도록 제안하였다. 어쨌든 이 방법은 β -effect로 인하여 확실한 방법이 될 수가 없다. Ahn(1990)은 β 의 문제점을 제거하고 “filter technique”의 강점을 살린 “혼성방법”을 사용하였다..

Ocean color 분석모델에서 다음으로 중요한 인자는 해수중 입자에 의한 역산란광의 크기를 알아야 한다. 현장에서 역산란광의 직접측정은 수행된바 없으며 거의 불가능하다. 해수덩이에 의한 총 역산란계수 (bulk backscattering coefficient)는 복사선의 전달식 (Radiative transfer equation)의 결과에 의한 역 추산으로만 가능하나 본 분석모델에서는 분석하고자 하는 입자에 따른 개개성분의 역산란에 대한 광특성이 측정되었다. 이에 대한 문제는 제3장에서 다시 논의 될 것이다.

지금까지는 해수색 원격탐사를 위한 여러 현장물질의 광학적 특성 측정의 문제점에 대하여 알아보았다.

해수 입자의 광특성 연구 (Optical properties of seawater particles)

위의 4 Component model의 연구를 위하여 아래와 같은 해당하는 입자들의 광특성이 다음단계로 진행되었다.

- 1) 분석 대상입자의 선정
- 2) 생물적 입자인 경우 배양 및 sample 준비
- 3) F(d) 및 광학적 parameters 측정
- 4) 역산란 계수의 광학적 측정을 위한 Model화
- 5) 현장 측정
- 6) OCRS의 Model화

3.1 분석 대상입자의 선정

- 1) 식물성 플랑크톤 : Size는 1 - 20 μm 범위에서 가능한 구형으로 종별 고르게 6종을 선정.
- 2) heterotrophs : free living marine bacteria
flagellates, cillates
- 3) Mineral particles

3.2 부유생물의 배양 및 무기입자 시료 준비

3.2.1 식물성 플랑크톤

f/2(Guillard & Ryther, 1962) 용액을 0.2 μm 의 Millipore로 2번 거른 후 살균한 후 다시 0.2 μm 의 Millipore로 거른 것을 배양액으로 사용하였다. 배양실 온도 18 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$, 20 W m $^{-2}$ 의 형광등 조명 밑에서 종에 따라 약 2 - 3주간 배양한 후 실험에 이용하였다. 배양된 cells density에 따라 희석하거나 혹은 농축하여 적당한 광학적 측정이 되도록 하였다.

3.2.2 해양 박테리아

여기서 사용된 배양법은 가급적 해수 내에서 자연상태와 같은 환경에서 배양하는 방법에 주안점을 두었고, 2가지 배양 방법이 사용되었다. 첫째, 해수 5ℓ를 가열 살균한 후 0.2 μ m 직경 47mm의 Millipore로 2번 거른다. 여기다 0.6 μ m의 nucleopore 통과한 해수를 수 ml를 접종한다. 이어서 이 배양액을 살균된 유리 용기에 넣고 검은 비닐로 햇빛을 차단한 후 배양실에서 2 - 3일 방치한다. Bacteria의 포식자들이 제거된 상태이므로 자연 해수상태에서 보다 약 10 - 100 이상 수적인 농도가 증가하게 된다. 이 순수 자연상태의 해수 배양액은 다시 직경 47mm, pore size 0.2 μ m의 nucleopore로 농축하면서 남은 배양액이 50ml 정도 되도록 한다. 결국 최종 세포농도는 광학적 연구에 필요한 약 10⁸ cells/ml 이상 되도록 한다.

둘째, 위의 방법은 cell density를 증가시키는 작업이 대단히 지겹고 시간을 요하는 힘든 일이다. 그러므로 배양액에 영양분을 공급함으로 농축 없이 원하는 세포수 농도 만큼 배양을 할 수 있다. 그러나 자연해수에서의 배양된 세포(0.5-0.7 μ m)보다는 훨씬 크게 된다(0.8-1.0 μ m). 사용된 배양액은 규산염이 첨가되지 않은 1ℓ의 F/4용액에 50mg의 glucose를 첨가하였다. 그 외의 모든 과정은 첫번째 방법과 동일하나 세포농도를 증가시키기 위한 농축과정이 필요하지 않다.

3.2.3 Flagellate & Cillate

pore size 5 μ m의 nucleopore로 거른 해수 2 - 3 ml를, 위의 2번째 영양액 방법으로 배양된 박테리아 배양액(세포 농도 10⁸ cells/ml 이상으로 탁하게 보임) 500ml 에 접종한다. 이때부터 배양액내의 flagellate의 세포농도 증가를 현미경으로 매일 관찰하여 성장곡선의 감쇠기 바로 직전에 배양을 중단한다. 이때까지의 소요일수는 약 4 - 7일이며, 배양액은 거의 맑아지게 된다. 이때 bacteria는 거의 먹히고 flagellates만 남게 되는데, 2 μ m와 5 μ m의 Nucleopore를 사용하여 2 μ m이하의 잔존 bacteria와 5 μ m이상의 입자들을 제거하였다. 이때 2 μ m의 필터는 농축의 역할도 겸하게 된다.

cillates의 배양 과정은 위 flagellate의 배양과 거의 비슷하나, 다만 10 μ m - 20 μ m의 필터를 통과한 접종해수를 사용한다. 이 배양액 내에는 초기에는 bacteria, flagellates, cillates가 동시에 있으나 최종적으로 cillates만 남게 된다. 이역시 10 μ m와 20 μ m의 nucleopore 필터를 사용하여 그 이하와 그 이상의

입자들을 제거한다. 물론 이들의 배양은 배양실에서 광을 차단한 상태에서 배양이 되어야한다.

3.2.4 무기 입자

광물질입자(loess)의 sampling은 바다에서 수행되지 않고 연안 육상의 토사가난 언덕에서 시료가 얻어졌다. 해수에서 시료채취를 하지 않은 이유는 우선 원하는 농도만큼 농축된 시료를 얻기 힘들었고, 둘째 해양에서는 무기 입자 외에 유기입자도 혼용될 수 있어 순수한 무기입자만을 얻기가 힘들 것으로 사료되었다. 채취된 시료는 외관상 크게 다르지 않으나 흔히 보여지는 황색의 탁수를 나타내는 흙으로 수분이 약하게 포함된 상태에서 나타나는 색깔로 구분하면 ;

- 1) Type A : 황갈색 흙(Loess)
- 2) " B : 황색의 흙(")
- 3) " C : 황적색의 흙(")
- 4) " D : 칼슘이 포함된 연 백색의 모래 등

4종으로 약 100g씩 채취되었다. 우선 전처리를 위하여, 500ml의 해수가 든 4개의 비커에 채취된 흙을 적당량 투입하고 세계 혼든 다음 5-10분 후에 탁한 부유수 만을 사용하여 100 μ m의 Nynetex screen으로 1차 거른다. 이렇게 침전과 filtering으로 부유 대형입자를 먼저 제거한다. 다음 용해 유기물을 제거하기 위하여 위의 흙탕물을 하루정도 방치하면 대부분 침전하여 위에는 맑은 해수로 남게된다. 이 해수에는 흙에서 용해되어 나온 용해유기물이 다량 녹아 있을 수 있으므로 상등액은 버리고 다시 걸러진 맑은 해수를 투입한다. 다시 한번 크게 혼든 다음 3시간 후, 큰 입자는 침전하고 작은 입자들만 다시 부유상태로 떠있게 된다. 아래에 침전된 입자는 버리고 부유 무기입자만 있는 용액을 다시 5 μ m의 nucleopore filter로 3번 정도 거른다. 실제 3 μ m이상의 입자는 대부분 제거되어진다. 이때의 무기입자물의 농도를 약 150mg l⁻¹ 정도로 낮추기 위하여 다시 맑은 해수로 1/5 - 1/10정도 희석하여 최종 sample이 만들어졌다.

3.3 입자의 비 흡수 및 역산란 계수 측정

3.3.1 입자의 Size 분포 측정

준비된 sample은 Coulter Counter(C.C; 모델 ZBI)로 입자수를 계수하고, 100-Channel analyzer(model C-1000)를 이용하여, $F(d)$ 즉 입자 크기 분포를 측정하였다. 이 C.C의 최저 측정입자의 크기는 약 $0.5\mu\text{m}$ 이라고 제안하고 있으나 실제로는 $0.8\mu\text{m}$ 가 한계였다. 일반적인 식물성 플랑크톤의 경우 아주 완벽한 입자분포도를 얻을 수 있으나 bacteria의 경우 직경이 $0.6 - 1.0\mu\text{m}$ 이므로 Size 분포곡선의 좌측은 noise로 인하여 측정이 불가능하였다. 문제 해결을 위하여 S/N비를 증가시키고 안정된 신호를 얻기 위하여 내부의 진공펌프를 외부로 내었다. 그 결과 모니터 상의 신호는 월등히 안정되었으며 최소 측정범위를 $0.6\mu\text{m}$ 까지 개선할 수 있었다. 사용된 tube의 orifice(Tube의 측면 작은 구경의 구멍) 구경은 입자의 크기에 따라 $20\mu\text{m}$ 에서 $100\mu\text{m}$ 를 사용하였다. 물론 Size 분포는 사용 전에 표준입자($0.6\mu\text{m}$ 에서 $5\mu\text{m}$ 까지)를 이용하여 기기를 교정하였으며, 계수된 입자수는 다시 광학현미경으로 비교 검정과정으로 확인하였다.($\pm 5\%$ 의 차이). 무기입자인 경우에는 입자 분포 형태가 Jung 분포이므로 총 입자수는 count하는 것이 불가능하다. 그러므로 “상대적인 입자분포”(F_r(d))를 측정하고 총 입자수는 attenuation coefficient 및 F_r(d)로부터 Van de Hulst 이론을 이용하여 역으로 입자수를 계산하였다 (Ahn, 1990 참조).

3.3.2 입자의 농도 측정

sample이 식물성 플랑크톤인 경우는 Jeffrey and Humphrey(1975) 방법에 의하여 클로로필 농도로서, 무기 광물질 입자인 경우 GF/F filter에 filtering 한 후 건조상태의 부유물 무게농도가 측정되었다.

3.3.3 흡수 및 소산계수의 측정

입자의 광특성 측정은 Perkin-Elmer 571 spectrophotometer 내에서 가시광 영역의 400 - 700nm까지 흡수계수(a)와 소산계수(흡수 및 산란된 광의 합; c)의 스펙트럼이 측정되었다(Bricuad et al., 1983; Morel & Ahn, 1990). 일반적으로 흡수계수는 optical cell을 광전관(PM tube) 바로 앞에 장착하여 전방 산란에 의한 광을 전부 회수할 수 있도록 만들어야 한다. 소산계수는

PM tube 앞에 광 차단 pin hole을 장착하여 산란되지 않고 직진한 광만이 감지되도록 하여 관측하였다. 그리고 산란계수(b)는 흡수계수와 소산계수의 차에 의하여 계산된다. 사용된 optical cell의 길이는 1cm를 사용하였으며 복합산란에 의한 측정의 오차를 줄이기 위하여 최대 광학적 두께($\tau = cz$; z : optical path length)의 값이 0.3 이하가 되도록 입자농도를 조절하였다.

무기입자인 경우는 충분히 sample 농도가 높으므로 a , c 및 부분 b_b 를 측정하는데는 큰 애로점은 없었다. 그러나 흡광 계수의 측정에서는 무기입자에 의한 강한 역산란광의 유실로 흡광 스펙트럼의 base line이 비정상적으로 높게 나타나 혼성방법(Ahn, 1990)으로 스펙트럼의 모양을 비교하여 수정하여 사용하였다.

3.3.4 부분 역산란계수의 측정

한 주어진 파장에서 역산란계수(b_b)는 광의 진행방향에서 $90 - 180^\circ$ 의 뒤 방향으로 산란되는 광의 세기를 의미한다. 이를 위하여 현장 해수 중에서 혹은 채수된 해수를 실험실에서 "Volume scattering function(Phase function 이라고도 부름)", $\beta(\theta)$ 를 측정한 후 각 $90 - 180^\circ$ 범위가 적분되어서 얻어진다.

$$b_b = 2\pi \int_{90}^{180} \beta(\theta) \sin \theta d\theta \quad (1)$$

현재 이 volume scattering function을 측정할 수 있는 기기가 있으나 산란 각에 따른 광량 측정이 자동화되지 않았으며 전 파장을 측정하는데는 엄청난 시간과 노력이 필요하다.

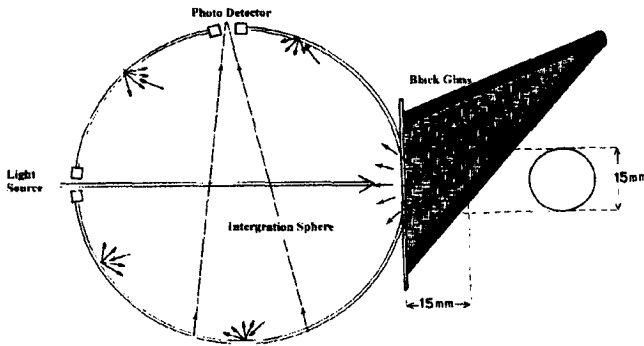
간편한 방법으로는 적분형 구가 부착된 분광기를 사용할 수 있다. 그러나 이 방법은 Surface reflectance(물체 표면에 의한 반사도)를 측정할 수 있으나 Volume backscattering(체적을 가진 것에 의한 역산란)은 한정된 각의 범위(약 $132 - 174^\circ$)내에서만 역산란 광을 받을 수 있을 뿐, 완벽한 역산란 광인 $90 - 180^\circ$ 전 범위에서 측정할 수 있는 형태의 광학적 기기는 불가능하다(Ahn, 1990). 그러므로 적분형 구를 이용할 경우 결손 각에 해당하는 산란광량이 이론적인 계산에 의하여 보상되어야 한다. 이 계산은 Mie 광 산란이론에 의하여 수행될 수 있으나 이를 위하여 새로운 광학적인 정보가 요구된다.

부분 역산란계수(b_b ; backscattering coefficient)는 LICOR-1800UW의 부속 기기인 직경 8cm의 적분형 구를 사용하였다(Fig 2-2, Ahn, 1990). 이 악세서리 적분구의 특징은 일반 spectrophotometer와는 다르게 monochromatic beam을 사용하지 않고 polychromatic beam을 사용한다. 그리고 적분구내에 설치된 photodiode로 빛이 입력되면 신호를 파장별로 나중에 분리하는 방식을 택하고 있다. 그러므로 여기서 얻어지는 신호는 식물성 플랑크톤의 경우 단파장에서 흡수된 빛이 적색에서 다시 형광을 내므로 역산란 신호에는 685nm 부근에는 형광에 의한 신호가 부가된다.

b_b 의 측정에 따른 어려움은 다음과 같이 구분해볼 수 있다.

- 1) 식물성플랑크톤이나 생물입자에 의한 역산란광의 크기는 입사된 광에 비하여 아주 약하므로(약 1/1000) 입자의 수를 흡수나 소산계수 측정시 보다 월등하게 높은 cell density를 가지야 한다. 그러므로 배양 sample을 다시 농축하는 과정이 필요하며, 그리고 multi-scattering에 의한 측정값의 오차를 유발할 수 있다.
- 2) 적분형 구(그림 2 참조)는 optical cell의 구조상 그리고 물-공기-유리사이의 전반사 효과와 광학 cell의 기하학적인 구조에 의하여 100 %의 역산란광을 받을 수 없으므로 측정된 역산란계수($b_{b\ m}$)는 이론적인 값에 의하여 결손부분이 보완되어야 한다.
- 3) 마지막으로 optical cell 내에서 순수한 역산란 광만을 만들기가 쉽지 않다. 대부분의 역산란 계수측정의 첫째 어려움은 여기에 있다. 즉, 입사된 광의 상당한 부분이 optical cell의 뒷벽유리에 반사되어 되돌아오기 때문에 이 반사광을 제거하여야 하며, 한번 optical cell로 입사된 광은, 입자에 의한 반사를 제외하고, optical cell 내에서 밖으로 나오지 말아야 한다. 그러므로 이러한 불필요한 신호를 제거할 수 있는 특이한 light trap의 구조를 갖춘 optical cell이 필요하다.

이러한 어려운 점들은 과거 문헌상에서 b_b 의 측정값을 찾아보기 어려운 이유를 잘 설명하고 있다. 그리고 몇몇 얻어진 경우도 절대적인 값은 없으며 신뢰도가 떨어지는 실험방법을 택하고 있다(Duntley, 1974; Kiefer et al., 1979; Bricquad et al., 1983). 여기서 측정된 sample의 cell density는 a, c 측정 sample 농도의 약 5배정도로 농축된 것을 사용하였다. 농축에는 cell size의 50 - 70% 정도의 pore size를 갖는 nuclepore filter를 사용하였으며 진공펌프대신 증력으로 자연스럽게 농축되었다. sample의 chlorophyll 농도는 약 0.1 - 1.5mg/ℓ 정도가 되었다. 이 정도의 고농도에서 복합산란에



의한 신호의 감소를 우려 하였으나 실험에 의하면 b_b 와 chlorophyll은 약 $5\text{mg}/\ell$ 까지 거의 비례하는 양상을 나타내었다.

Fig. 2. Intergration sphere for the partial backscattering coefficient.

3.4 역산란계수 측정을 위한 광학적 Model

Mie 이론이란 한 주어진 파장에서 한 입자에 입사된 광자가 있다고 하자. 만약 매질에 대한 이 입자의 상대굴절지수(n)과 흡수지수(n')의 값이 알려져 있다면, Mie 이론은 각에 따른 산란계수($\beta(\theta)$; volume scattering function)를 준다. 결국 Eq. (1)에 의하여 결손 각에 해당하는 부분 역산란광($b_{b\ p}$)를 계산할 수 있으며 이양은 전체 역산란광(b_b)에 대한 비값($G.F = b_b/b_{b\ p}$)을 계산할 수 있다(Ahn *et al.*, 1992). 이 값을 optical cell의 기하학적인 보정계수(G.F)라 하며 측정된 역산란계수에 곱해야 한다.

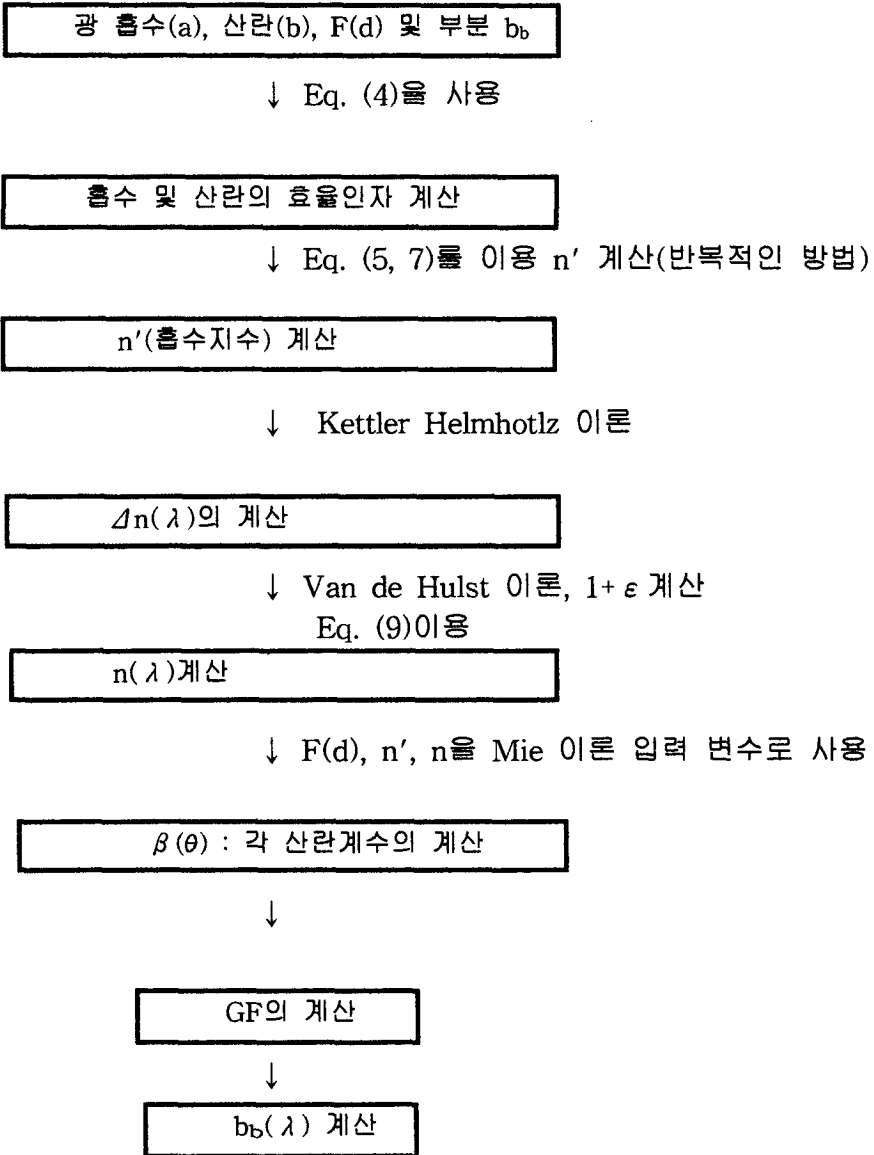
$$b_b(\lambda) = b_{b\ m}(\lambda) \times G.F(\lambda) \quad (2)$$

위에서 subscript "m"은 측정(measurement)을 의미한다. 최종적으로 특성 역산란계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$b_b^*(\lambda) = b_b(\lambda) / \langle \text{분석대상물질의 농도} \rangle \quad (3)$$

우선 $b_b(\lambda)$ 의 절대값을 구하기 위한 보정계수(G.F)의 유도 과정을 모델화 하면 다음과 같다.

<역산란광 계수 측정 모델의 도식화>



3.4.1 광 흡수 및 산란의 효율인자 계산

흡수 효율인자(absorption efficiency factor ; Q_a)는 다음과 같이 정의되며;

$$Q_a = \frac{\text{입자에 흡수되는 총 energy}}{\text{입자에 단면에 입사되는 총 energy}}$$

실제 Q factor의 측정 및 계산은 우선 흡수, 소산계수의 측정을 한 후 Coulter counter에 의한 size 분포(F(d))의 측정결과를 이용하여 다음 식으로 계산된다.

$$\overline{Q}_{i m} = i \left\{ \pi/4 \int_0^{\infty} F(d) d^2 dd \right\}^{-1} \quad (4)$$

$\overline{Q}_{i m}$: 측정(m)된 평균값 Q

i = 광 흡수(a), 산란(b) 및 소산(c) 계수 ($b = c - a$)

F(d) : sample의 size분포 (= $N / (d_v \pm \Delta d)$)

* d_v : volume reference diameter이며, Δd 는 coulter counter에서 100channels로 나누어졌으나 계산의 양을 줄이기 위하여 20channels로 축소하였다.

d : 입자의 지름

3.4.2 Van de Hulst 이론에 의한 Q factor

Van de Hulst(1957)이론은 입자에 의한 광산란과 흡수효율 이론을 복잡하고 계산이 긴 Mie 이론으로부터 단순화시킨 것으로, 한 입자의 흡수지수 n' 과 상대굴절지수 n, 입자의 size d가 주어질 때 흡수효율 인자(Q_a)와 소산 효율인자(Q_c)가 다음과 같이 주어진다.

$$Q_a(\rho') = 1 + 2 \frac{\exp(-\rho')}{\rho'} + 2 \frac{\exp(-\rho') - 1}{\rho'^2} \quad (5)$$

$$\rho' = 4 \alpha n' \quad (\text{흡수에 대한 입자의 광학적 thickness})$$

$$\alpha = \pi d n_w / \lambda \quad (\text{파장에 대한 입자의 상대적 크기})$$

- α : 입자의 광 파장에 대한 상대적인 크기
- * n_w : 해수(1.033)의 상대굴절지수이나 복합적으로 여러 물질을 고려하여 1.035를 사용.
- λ : 입사광의 공기중에서의 파장

$$Q_c(\rho) = 2 - 4 \exp(-\rho \tan \xi) \left[\frac{\cos \xi}{\rho} \sin(\rho - \xi) + \left(\frac{\cos \xi}{\rho} \right)^2 \cdot \cos(\rho - 2\xi) \right] + 4 \left(\frac{\cos \xi}{\rho} \right)^2 \cos 2\xi \quad (6)$$

$$\tan \xi = n' / (n - 1)$$

$$\rho = 2 \alpha (n - 1)$$

위에서 ρ (Phase lag)의 물리적 의미는 광이 굴절률 n 인 입자를 통과하는 동안 매질보다 지연되는 광로를 의미한다. 이것은 위의 ρ' (흡수에 의하여 자체되는 optical thickness)과 유사한 의미를 갖는다.

(* Van d'Hulst 이론의 취약점은 Q_a 와 Q_c 값은 계산되나 Q_{bb} (역산란 효율인자)의 계산은 할 수 없으며, Mie 이론에 의하여서만 계산할 수 있음)

3.4.3 입자의 흡수지수 n' 의 계산

우리는 입자의 역산란 계수를 보완하기 위하여 Mie 이론의 입력 값인 입자 sample의 n 과 n' 의 값이 계산되어야 한다. 아래 식은 우선 n' 을 계산하기 위한 식이다.

$$\overline{Q_a} = \frac{\int_0^\infty Q_a(\rho') F(\rho') \rho'^2 d\rho'}{\int_0^\infty F(\rho') \rho'^2 d\rho'} \quad (7)$$

$$(* \rho' = 4 \alpha n')$$

윗 식의 한 주어진 파장에서 좌변(Q_a)은 측정(m)된 것이고 우변은 다중 분포된 입자들의 흡수지수가 n' 이라고 가정할 때 계산되는 이론적인 값이다. 즉 우변의 n' 을 계속 변화시키면서 얻어지는 Q_a 가 좌변의 측정된 값과 같아 질 때까지 계속 반복한다. 그리고 파장 400nm에서 750nm까지 반복된다.

3.4.4 상대 굴절지수 n 의 계산

<Bricquad & Morel's model>

Eq. (7)에서 $n'(\lambda)$ 이 얻어지면 $n'(\lambda)$ 는 다시 몇 개(8 - 9)의 소 흡수 oscillator로 나누어진다. 즉, 소 oscillator $n_i'(\lambda)$ 의 합이 $n'(\lambda)$ 가 되어야 한다. 이 과정은 시행착오의 과정으로 재분석-합성의 과정을 되풀이하여 얻어진다. 진동자수는 많을수록 보다 충실하게 $n'(\lambda)$ 를 재구성할 수 있으나 보다 많은 시간이 소요된다(본 연구에서는 이 과정을 자동화하는 S.W를 programming하여 이러한 문제를 해결하였음). 일단 소 진동자 $n_i'(\lambda)$ 는 Kettler-Helmholtz¹⁾ 이론에 의하여 다시 소 $n_i(\lambda)$ 로 전환된다(그림 3 참조). 그리고 다시 전 파장에서 각각의 $n_i(\lambda)$ 의 합이 $\Delta n(\lambda)$ 가 된다.

아직도 한가지 남은 문제는 $n(\lambda)$ 의 중앙값($1+\epsilon$)을 구하여야 한다. $1+\epsilon$ 의 값을 얻기 위하여 같은 입자분포를 가지나 비 흡수(NAE) 입자인 $Q_c(\lambda)^{NAE}$ 를 계산한다. ϵ 의 값은 zero부터 충분히 높은 값까지 계산한다. 이어서 측정된 $Q_c(\lambda)$ 와 이론적인 $Q_c(\lambda)^{NAE}$ 를 비교하여 2 스펙트럼이 가장 유사한(눈으로 판독) ϵ 의 값이 다음과 같이 얻어진다.

$$m(\lambda) = (1+\epsilon) + \Delta n(\lambda) - i n'(\lambda) \quad (8)$$

<Stramaski model>

위에서보면 BM 모델은 소 진동자 $n_i'(\lambda)$ 와 $1+\epsilon$ 를 찾기가 아주 복잡하다. 그러나 Stramaski의 모델은 $1+\epsilon$ 를 찾는 과정이 없으며 전반적으로 아주 단순하다. BM 모델처럼 우선 $n'(\lambda)$ 가 먼저 계산되면 곧 바로 측정된 $Q_c(\lambda)$ 와 이론적인 $Q_c(\lambda)$ 를 반복적인 방법으로 수렴할 때까지 n 을 다음 식에서 계속 변화시킨다.

1) 흡수지수 n' 의 변화에 따른 굴절지수 n 의 변화 관계를 나타낸 이론.

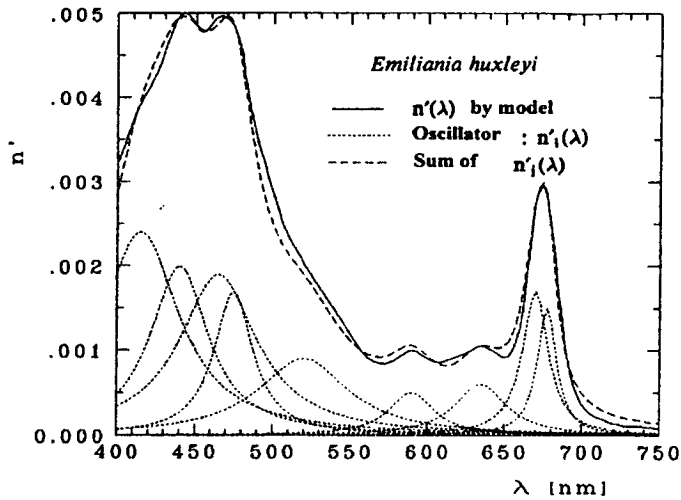


Fig 3. The experiment value of absorption index, n' , deduced from those of absorption, are shown as continuous line. This spectrum is decomposed into 9 small oscillators(.....), of variable amplitude and width. The sum of each small oscillators is reconstructed (----) and compared with original n' .

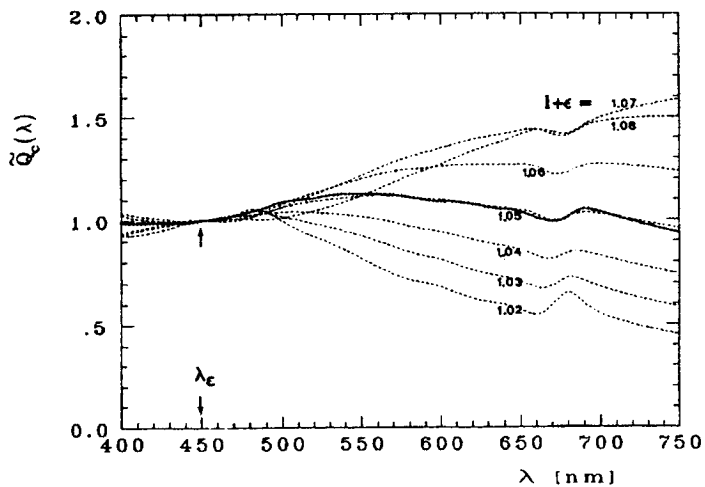


Fig 4. Theoretical variation of $Q_c(\lambda)$ (.....) according to $1+\epsilon$ values are compared with measured $Q_c(\lambda)$ (—).

$$\bar{Q}_c = \frac{\int_0^{\infty} Q_c(\rho) F(\rho) \rho^2 d\rho}{\int_0^{\infty} F(\rho) \rho^2 d\rho} \quad (9)$$

$$(* \rho = 2 \alpha (n-1))$$

상기 방법은 수학적으로는 완벽하다. 그러나 이것은 관측된 $F(d)$, a , c 의 값이 정확하며 sample 입자가 정확한 구형이면 이론적으로 문제없이 두개 값은 서로 수렴하게 된다. 그러나 현실적으로 BM 모델이나 Stramski 모델은 위의 가정을 한가지라도 만족하지 않으면 이론치와 실측치가 수렴하지 않을 가능성이 아주 높고 $n(\lambda)$ 의 계산은 실패로 끝나게 된다. 본 연구중 이러한 현상은 아주 흔하게 발생되었다. 그리고 Stramski 모델은 설사 측정의 오차가 있어도 입자의 size가 작은 범위($\rho < 4$) 내에 있으면 error 발생 없이 의미 없는 수학적 계산 값을 얻게된다.

두 모델의 차이점을 보면; BM모델은 전과장의 값을 비교함으로 먼저 수렴이 있는지 없는지를 사전에 알 수 있다. 그리고 절차과정이 대단히 복잡하다 (Bricuad & Morel, 1986). 그러나 Stramski 모델은 주로 size가 작은 입자인 경우에 편리하며 Van de Hulst이론을 사용하여 바로 반복적인 방법으로 n 의 값을 구할 수 있다. 수학적으로는 완벽하다. 그러므로 BM 모델보다 훨씬 빠르게 값을 구할 수 있다. 그러나 입자 size가 커지고 앞에서 언급한 조건에 맞지 않으면 계산은 실패하게된다.

<본 연구 모델>

그래서 본 연구에서는 위 모델을 보완하여 사용하였다. 즉, 2 가지 점에서 앞의 모델을 개량하였다고 볼 수 있다.

- 1) BM 모델의 핵심인 $n(\lambda)$ 중심 값($1+\epsilon$)을 찾는 지루한 과정을 제거
- 2) 측정의 error로 인한 수렴실패 문제 제거

위에서 입자가 “전혀 흡수를 하지 않는 입자”(NAE)이면 $\Delta n(\lambda)$ 은 전과장에서 “0”이며 $n(\lambda)$ 은 파장에 따라 일률적으로 같은 상수 값을 가지게 된다. 먼저 ϵ 값을 zero부터 적당한 증가 값으로 Eq. (9)에 입력을 시작한다. $1+\epsilon$ 는 $n(\lambda)$ 의 중앙값이므로 $\Delta n(\lambda)$ 은 $1+\epsilon$ 을 중심으로 \pm 로 값이

변하게 된다. 그 중에는 $\Delta n(\lambda) = 0$ 가되는 파장(흡수의 영향이 없는 곳)이 적어도 한곳에 발생한다. 이곳의 파장을 λ_ϵ 이라면 이 파장에서 이론적인 $Q_c(\lambda_\epsilon)$ 의 값을 측정된 $Q_c(\lambda_\epsilon)$ 와 비교한다. 만약 두 값이 일치하면 ϵ 의 값이 정확한 것이며 타 파장에서도 두 값은 일치하게 된다. 그러나 λ_ϵ 에서 두 값이 일치하지 못하면 타 파장에서도 전부 일치하지 못할 것이며 이것은 앞에서 언급한 측정 및 조건들이 적합하지 못하였기 때문이다. 이 경우에는 측정된 $Q_c(\lambda_\epsilon)$ 스펙트럼을 이론적인 값을 기준하여 파장 λ_ϵ 에서 규격화한다. 그리고 전 파장에서 이론치(th)에 대한 실측치(me)와 Error 합을 다음과 같이 구한다.

$$\text{Err}(\epsilon) = \sum_{\lambda_i=400}^{700} [Q_c(\lambda_i)_{\text{th}} - Q_c(\lambda_i)_{\text{me}}]^2 \quad (10)$$

위에서 ϵ 의 값을 계속 반복하여 $\text{Err}(\epsilon)$ 의 값이 최소가 될 때까지 반복한다. 파장은 5nm의 간격으로 400에서 700nm까지 계산되었다. 또 다른 방법으로는 일반적으로 $\text{Err}(\epsilon)$ 의 최소치는 ϵ 에 대한 $\text{Err}(\epsilon)$ 의 2차 미분형 $\geq \text{zero}$ 인 경우에 얻어질 수 있다. 이렇게 얻어진 ϵ 은 Eq. 11에서 전 파장의 값으로 계산된다. 위와 같은 방법으로 $1+\epsilon$ 의 변화에 따른 이론치의 $Q_c(\lambda)$ 가 실측치와 일치되어 가는 과정을 Fig. (4)에 나타내었다. 이 그림에서 보면 ϵ 의 값이 맞지 않으면 2가지 점에서 불일치가 일어난다. 1) 파장에 따른 스펙트럼의 경향이 전혀 일치되지 않으며, 2) 685nm 근방에서 일어나는 흡수에 의한 “anomaly dispersion effect”가 일치되지 못함도 볼 수 있다.

3.4.5 Mie 이론에 의한 $\beta(\theta)$ 와 Q_{bb}

입자들에 의한 광산란 현상은 흔히 접하는 물리적인 현상이다. 특히 대기광학에서 푸른 하늘의 광 scattering 설명하기 위한 연구가 지난 세기말에 엄청난 연구가 수행되었다. 여기에서 collide 상태의 입자에 의한 광산란의 일반적인 해가 Maxwell의 전자파 전파 이론에 근거를 하여 Lorentz Mie(1908)에 의하여 얻어졌다.

태양광선이 대기에 의한 광 산란(sky light scattering)이론은 Rayleigh의 molecular scattering 이론에 의하여 잘 설명이 되어졌다. 이 경우는 입자(공기분자)의 Size가 광의 파장에 비하여 대단히 작은 경우에 한한다. 그러나 대기중의 먼지, aerosol 등에 의한 광산란 이거나 해수중 부유입자에 의한

광 산란인 경우는 입자의 size가 광의 파장과 비교될 만큼 비슷한 수준이 되면 Rayleigh 이론이 맞지 않게 되며, Mie 이론이 적용되어야 한다. Mie 이론에서는, 물론 입자의 size가 분자상태의 크기로 작아지면 정확하게 Rayleigh의 이론과 같은 결과를 얻을 수 있다.

이 Mie 이론의 해는 Legendre의 다항식, Ricatti-Bessel 과 Ricatti-Hankel function으로 얻어진다. 그러므로 이의 계산은 computer의 도움 없이는 불가능하였다. 지난 반세기동안은 computer의 발달과 더불어 이 Mie 이론의 실험적인 측정값과 이론적인 값의 일치 여부를 확인하기 위하여 많은 연구가 수행되었으며, 그 결과 Mie 이론의 완벽함을 뒷받침하는 연구결과가 나왔었다.

즉, 구형이며 균질체인 한 입자에 입사하는 광자들이 있을 때 각도에 따른 산란광의 세기($i(\theta)$)를 계산할 수 있다. 이어서 이 매질의 입자의 Size분포가 알려지면 $\beta(\theta)$ (volume scattering function)를 계산할 수 있게 된다. 즉, 입자의 크기가 α , 굴절지수가 $m(=n - in')$ 인 입자에 입사한 광에 의한 Mie solution은 (편광의 효과를 무시하여) 산란광의 강도 $i(\theta, \alpha, m)$ 로 주어진다. 이것은 volume scattering function과 다음과 같은 관계가 성립한다 (Morel & Bricaud, 1986).

$$\beta(\theta) = \frac{i(\theta)}{\pi Q_b \alpha^2} \quad (11)$$

Q_{bb} 는 다음 식으로 주어진다

$$Q_{bb}(\alpha, m) = \frac{2}{\alpha^2} \int_{\pi/2}^{\pi} i(\theta, \alpha, m) \sin \theta \, d\theta \quad (12)$$

3.4.6 Optical cell의 기하학적인 보정계수(G.F)

위에서 Mie이론에 의하여 얻어진 입자 sample의 $\beta(\theta)$ 는 광학적 cell의 기하학적인 구조에 의하여 발생하는 역산란광의 보완 factor를 계산하는데 필요한 것이다. optical cell의 형태에 의하여 달라지는 이 factor의 구체적인 서술은 AHN *et al.*(1993)에 잘 설명되고 있다. 수학적 표현은 다음과 같다.

$$GF(\lambda) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \beta(\theta, \lambda) \sin \theta \, d\theta \, d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \beta(\theta, \lambda) V(\theta) \sin \theta \, d\theta \, d\phi} \quad (13)$$

광학적 cell내의 미소 단위체적들인 $V(\theta)$ 는 누적함수(Weighting function)이면서 상대적인 값으로 역산란광이 한 주어진 각도(θ)에서 cell내로 모두 들어 갈 수 있을 때 이 값은 1이 된다. 그러나 90° 에서 132° 사이에서는 물과 공기의 전반사 효과와 cell과 적분구의 모양에 의하여 전 각도에서 "0"이 된다. 또, 180° 부근에서는 적분구의 들어오는 광을 위한 구멍으로 인하여 다시 빠져나가므로 그 값은 "0"이 된다.(Fig. 5 참조)

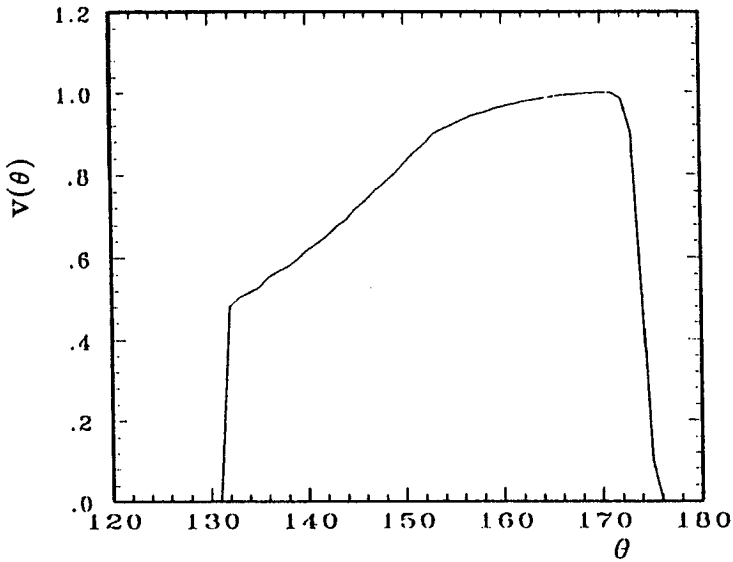


Fig. 5. Effective portion of total volume scattering within the cell, $V(\theta)$ as function of scattering angle θ .

3.5 광학적 특성 결과 및 토의

위의 원격탐사 대상물질인 4개 성분 외 해수를 포함하여 관측된 입자, 물질의 광학적인 특성에 대하여 그 결과를 서술 정리하였다. 각각 항목별 연구된 결과는 다음과 같다.

3.5.1 해수의 광학적 특성

해수의 광학적인 특성의 연구결과는 이미 Morel(1966, 1974)에 의하여 잘 알려져 있다. Morel은 증류수의 광학적 연구로부터 시작하였다. 많은 연구자의 관측결과가 있으나 상당한 차이가 있으며 특히 단파장으로 갈수록 측정자에 따른 편차가 증가한다. 외형적으로 가장 투명한 파장은 약 475nm 부근으로 이 최소의 소산계수(coefficient of attenuation) 값은 약 0.021m^{-1} 이다. 이것을 투과도(transmittance) 환산하면 1m당 약 98% 정도 된다. 그러나 700nm에 이르면 투과도는 53%/m로 급격히 감소된다. 순수의 volume scattering function, $\beta(\theta)$ 의 이론적인 표현은 다음과 같다(Ivanoff, 1975).

$$\beta(\theta) = \beta_{90^\circ} (1 + P_{90^\circ} \cos^2 \theta) \quad (14)$$

P_{90} 은 90° 각으로 산란하는 빛의 편광도를 의미한다. 해수의 total scattering 계수(b_w)는;

$$b_w = 2\pi \int_0^{180} \beta(\theta) \sin \theta d\theta \quad (15)$$

순수의 광 산란 특성은 분자에 의한 산란(molecular scattering)이므로 전후방의 산란광의 세기는 동일하다. 즉 역산란계수의 크기는 정확하게 해수의 총 산란계수의 1/2이 된다. 그리고 파장(λ)에 따른 산란의 크기는 $\lambda^{-4.3}$ 로 감소하게 된다. 다음 Fig. (6)은 Morel et Prieur(1977) 및 Baker(1981)에 의한 해수의 측정결과를 나타낸다. 최소 흡수대는 430 - 440nm에서 나타나며 장파장으로 갈수록 흡수는 급격하게 증가하게 된다.

$$b_{bw} = \frac{1}{2} b_w \quad (16)$$

해수에 의한 광산란은 염분(양이온 및 음이온)에 의한 효과로 순수보다 약 30%정도 더 산란하게 된다. 그러나 염분으로 인한 흡수에 미치는 영향은 미약한 것으로 알려져 있다.

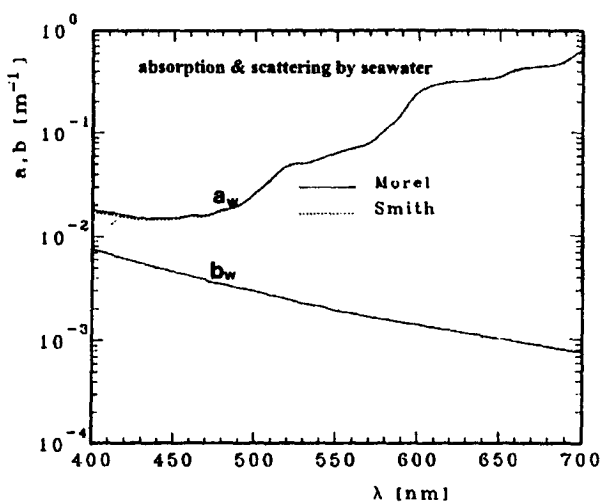


Fig. 6. Optical properties of pure seawater. Note that absorption(a_w) effect is more great then scattering(b_w).

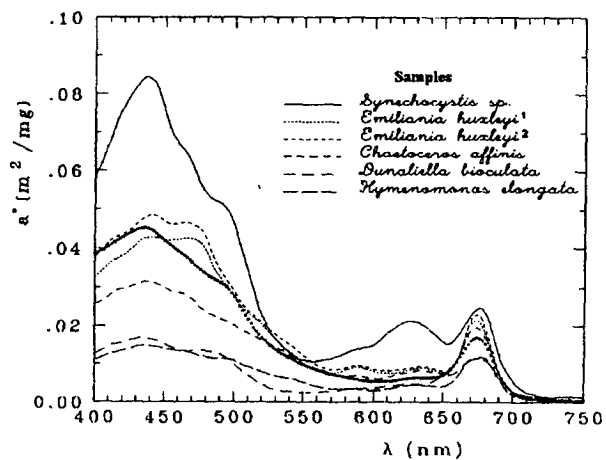


Fig. 7. Spectral variation of the chlorophyll-specific absorption coefficient, a^* , for different phytoplanktonic species. Bold line show mean value spectrum used in this model.

해수의 광특성의 또 다른 유의점은 일반적으로 부유 입자와는 다르게 흡수의 효과가 산란보다 훨씬 크다. 산란 및 흡수계수의 값은 본 연구의 부록으로 수록하였다.

3.5.2 식물성 플랑크톤

해양원격탐사에서 가장 중요한 대상 생물로 이들 양의 추정에는 결국 “단위 chlorophyll 농도당 얼마의 광에너지를 흡수”(a_{ph}^{*})하는가에 있다. 최종적으로는 해당물질의 해수 내에서 흡광계수를 구하고 이 값을 다시 a_{ph}^{*}의 값에 의하여 chlorophyll 농도로 환산되어야 한다. 그러므로 왜 해당물질의 비계수(Specific coefficient)가 얻어져야 하는지가 설명된다.

식물성플랑크톤은 해수의 수색을 가장 크게 변화시킬 수 있는 요소로써, Ocean color 원격탐사에서 가장 중요한 광학적 인자이다. 해양에서 식물성플랑크톤의 비 흡수특성(a_{ph}^{*})계수의 값은 이미 많은 연구가 수행되었으며, 해역에 따른 종의 분포특성차이로 다양한 값을 나타내었다. Morel & Bricquad(1981)는 같은 클로로필 농도를 갖는 해역일지라도 식물성플랑크톤의 Size분포가 달라지면 a_{ph}^{*}의 값이 크게 차이가 발생할 수 있음을 이론적으로 이미 증명하였다. 다음 식은 a_{ph}^{*}의 값이 cell의 크기(d)와 세포내의 chlorophyll 농도(c_i)에 따라 반비례하여 감소함을 잘 보여준다

$$a_{ph}^*(\rho') = \frac{3}{2} Q_a \frac{1}{c_i d} \quad (17)$$

이 현상을 “package effect”(Kirk, 1975, 1976) 혹은 “discreteness effect”(Morel & Bricquad, 1981)하였다. 다시 말하여 클로로필의 농도가 같은 두 해수에서 Kirk는 입자의 대형화에 따른 a^{*}가 감소되어 감에 강조하였고, Morel은 입자의 미립자화로 인한 a^{*}값의 증가에 point를 둔 표현의 차이를 나타낸다.

본 연구에서는 a_{ph}^{*}의 값을 순수 배양된 14종의 식물성플랑크톤의 평균치를 사용하였다(Morel, 1988)(Fig. 7).

비 역산란계수(b_b^{*ph})는 Ahn *et al.*(1993)에 의하여 처음으로 정량적인 측정이 수행되었으며, Mie 이론 의한 비교검증을 통하여 처음으로 식물성플랑크톤에 의한 역산란의 세기를 유도하였다. 여기서는 연구결과만을 다음에 나타내었다(Fig. 8).

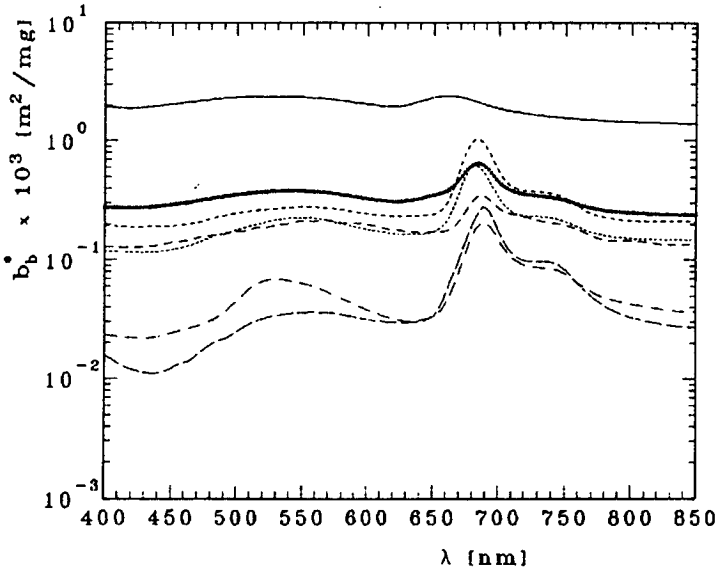


Fig. 8. Chlorophyll specific backscattering spectrum of phytoplankton for the different species. Bold line is shown the average value used in this model.

파장 680nm에서의 peak는 형광에 의한 것으로 역산란 신호보다 훨씬 강하게 나타나는 것도 흥미롭다. 역산란의 크기는 파장 550nm에서 값의 범위는 종에 따라 2×10^{-5} 에서 10^{-3} [m^2/mg]까지 그 편차가 무려 50배까지 벌어졌다. 이 사실은 해양에서 해수색의 변화는 식물성플랑크톤의 역산란 signal에 의한 것이 아님을 보여준다. 다시 말하여 해양에서는 식물성플랑크톤의 농도가 높을수록 산란보다는 흡수가 효과가 증가하여 해수색이 점차 어두워 지게된다는 것이다. 이 사실은 ocean color simulation에서 잘 증명되고 있다(Ahn, 1990). 그러나 여기서 식물성플랑크톤이 강한 역산란을 일으키는 것으로 잘못 인식되는 자연현상이 있다. 그것은 적조 발생 시 간혹 해수색이 붉게 진하게 보이는 현상이 일어나는데, 두 가지로 이유로 설명된다. 즉, 하나는 입사된 태양광에 의하여 발생된 붉은색의 형광이 주범이며, 둘째는, 파도에 의하여 부서진 산란광인 흰색 파도를 배경으로 하여 적조생물에 의한 blue-green-yellow 색상이 흡수되고 비 흡수파장인 적색만 통과하여 우리 눈에 도달하기 때문으로 해석된다. 그러나 일반적으로 후자

가 더 큰 원인으로 설명된다)

이론적인 $b_{b\text{ ph}}^*$ 의 표현은 다음과 같이 유도될 수 있다(Ahn, 1990).

$$b_{b\text{ ph}}^* = 3\pi \frac{(n_{\text{ph}} - 1)n_w}{\lambda c_i} \frac{Q_{\text{bb}}(\rho)}{\rho} \quad (18)$$

이 식에서 보는 바와 같이 단위 클로로필 농도당 식물성플랑크톤의 역산란 능력은 파장에 대한 입자의 상대적 크기(ρ)에 반비례함을 볼 수 있다. 그 외에도 cell size(ρ)와 cell 내부 클로로필농도(C_i)값이 작으면 $b_{b\text{ ph}}^*$ 의 값은 크게 증가하게 된다. 여기서도 discreteness effect가 흡수보다 더욱 강조되어 나타나고 있다.

본 연구에서 채택한 $b_{b\text{ ph}}^*$ 의 값은 물론 종에 따라 그 편차도가 상당히 크나 앞에서 방법으로 6종의 식물성플랑크톤을 배양하여 그 평균치를 사용하였으며 부록으로 그 값을 나타내었다.

3.5.3 무색의 종속영양생물(heterotrophe)

해양생물에서 90% 이상의 생체량은 size $0.6\mu\text{m} - 10\mu\text{m}$ 범위에 크기에 속하며 그 중에서 숫적으로 가장 많은 미생물은 1ml 당 $10^4 - 10^6$ cells인 free living bacteria이다. 이들은 해양의 2차 생산자의 기본생물로 물질순환에 또 다른 측면에서 크게 기여하고 있다. 최근에 와서 이들의 중요성이 더욱 강조되고 있는데 그 이유는 지금까지 해양에서 이들의 생체량을 너무나 과소 평가하였다는 연구결과가 많이 나오고 있기 때문이다. 과거에는 이들의 해양에서 생체량은 일차생산량의 5 - 10%로 추정하였으나 최근에는 최대 30%까지 이른다는 보고가 나오고 있다. 그 외에도 이들은 open ocean에서는 무기영양물을 획득을 위한 phototrophe와 경쟁관계에 있다는 연구결과도 있다. 이들 bacteria의 생태적인 바로 윗 단계의 생물체는 편모충류(flagellate)이며 그 상위단계는 섬모충류(ciliate)로 이들의 생체량도 무시할 수 없는 량이다(Rassouzadegan & Sheldon, 1986). 우리는 여기서 더 이상의 상위 단계에 있는 동물성플랑크톤은 해양에서 광학적인 기여도가 무시할 수 있다고 가정하고 더 이상 고려하지 않았다.

현재까지 이들의 해양에서 광학적인 역할에 관하여서는 전혀 고려의 대상이 대지 않았다. 그 이유는 이들이 거의 무색 이므로 광흡수는 무시 가능

하다고 인정하여왔다. 그러나 이러한 문제를 규명하는데는 무엇보다 해양생물-광학적인 어려움이 포함되어 있었기 때문으로 사료된다. Morel & Ahn(1990)은 처음으로 이들의 해양에서의 optical role 및 해양 지화학적 측면에서 중요성을 강조하였다. 해양 Bacteria의 크기는 0.6 - 1.2 μm 로 이들은 타 미생물에 비하여 세포내 carbon 농도가 훨씬 높다. 그러므로 크기는 작지만 해양에서 전체 미생물의 carbon 생체량 중 상당량을 이들이 차지하며, 작은 입자의 특성인 역산란의 높은 효율성으로 인하여 Ocean color remote sensing 기술개발에 무시할 수 없는 역할을 하고있다 하였다.

이들의 광학적인 특성에서 가장 두드러진 역할은 바로 고효율의 역산란 기능에 있다. 즉 이들은 해양에 입사된 상당량의 빛을 역으로 반사시킴으로써 해수의 반사도를 증가시키는 역할을 하는 것으로 규명되었다(Ahn, 1992). 그러나 해양의 Ocean color simulation을 위하여서는 이들의 통합적인 역할이 고려되어야 한다. 해수에서 이들에 의한 흡수 및 역산란계수를 나타내는 기준은 cells density가 되어야 한다. 그러므로 이들 미생물의 비흡광 및 비 역산란계수는 Q_a 및 Q_{bb} 로 표현되거나 혹은 단위 cells density 당 흡수 및 역산란계수로 표현되어야한다. 다음 Fig. (9)는 bacteria와 flagellate의 1 cell의 평균 Q_a 및 Q_{bb} 를 나타낸 것이다. 이 들이 비록 무색이긴 하지만 파장 440nm에서 cell에 입사하는 광의 2 - 6%을 흡수하며, 식물성 플랑크톤의 흡수량 40 - 80%에 비하면 상당히 미약한 값이다. 그러나 역산란효율인 Q_{bb} 는 bacteria의 경우 가시영역에서 대체로 0.1%, flagellate의 경우 약 0.04%로 phytoplankton의 0.1%(Ahn, 1990)와 거의 유사한 값을 보여준다. 본 연구에서 최종적으로 얻어진 비 흡광계수는 다음과 같이 계산되었다.

$$a(\lambda) = Q_a(\lambda) \cdot s \cdot \langle \text{cell density} \rangle \quad (19)$$

$$b_{bb}(\lambda) = Q_{bb}(\lambda) \cdot s \cdot \langle \text{cell density} \rangle \quad (20)$$

여기서 입자의 s 는 cross section으로 $s = 1/4 \pi d^2$ 로 주어지며, $\langle \text{cell density} \rangle$ 는 단위부피당 cell수[cells/m³]이다. 그리고 흡수 및 역산란 값을 구하기 위하여 bacteria의 평균 입자크기는 0.6 μm 로, flagellate의 size는 $d=3.5 \mu\text{m}$ 로 하였다. 이 값들은 실험기간 중 측정된 이들 입자의 평균 크기이다. 실제로 해수색 분석모델에서는 bacteria의 cell 수가 1000cells/ml인 경우를 기본단위로 하였다. 만약 440nm에서의 bacteria의 비 흡광계수를 대략 계산하면 위 식에서 $(0.02 \cdot 1/4 \cdot 3.14 \cdot (3 \times 10^{-7} \text{m})^2 \cdot 10^9/\text{m}^3 =) 1.4 \cdot 10^{-6} \text{m}^{-1}/1000\text{cells}$ 이 된다.

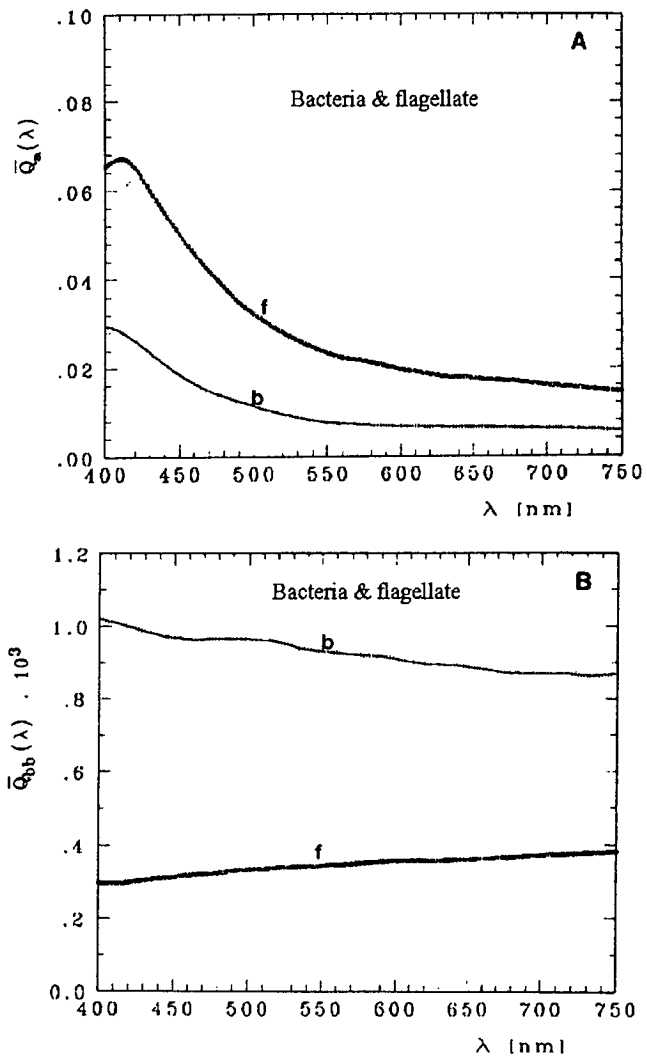


Fig 9. Efficiency factor for absorption and backscattering for bacteria and flagellate. Q_{bb} value are computed from Mie theory using $F(d)$, n' and n .

즉 입자 size가 작아질수록 입자수는 지수 함수적으로 급격하게 증가됨을 의미한다. 본 연구에서 측정된 무기입자의 경우도 역시 이 Jung의 분포를 잘 따르는 것으로 나타났다. 미네랄 입자의 역산란 계수 측정은 앞의 식물성 플랑크톤보다 더욱 어렵다. 그 이유는 앞에서 언급하였듯이 optical cell의 기하학적인 보정치를 계산하는데 이들의 size 분포 및 총 입자수가 필요하다(n' 과 n 의 계산). 그러나 Jung 분포를 하고 있으므로 총 입자수를 coulter count로 헤아리기란 거의 불가능하므로 제한적인 입자 size 분포 범위 내에서 이론적인 입자수가 계산되어야 한다. 본 연구에서는 미네랄 입자의 최소 size를 $0.3\mu\text{m}$ 로 가정하였다. 그러나 coulter counter로는 최소입자의 한계가 $0.6\mu\text{m}$ 이므로 Jung 분포라는 가정 하에 외삽법을 이용하여 0.3에서 $0.6\mu\text{m}$ 까지는 상대적 size 분포를 확장 보충하였다. 그리고 Van de Hulst 이론을 활용하여 이론적인 총 입자수가 계산되었다(보다 자세한 방법은 Ahn, 1990 참조요망). 그리고 그 다음부터는 식물성플랑크톤의 역산란계수를 구하는 방법과 일치한다.

3.5.4.1 무기입자의 비 흡광계수

식물성플랑크톤과 마찬가지로 a_m^* 의 값이 측정되었다. Fig. (11)은 4개의 흙의 type에 따른 값을 나타내었다. 이 결과에 의하면 외관상의 흙색의 진하기에 따라 상당한 흡수도의 차이가 나타났다. 일반적으로 흙 색깔은 황색에서 적색으로 흙내에 포함된 산화철에 의한 색깔이므로 결국 흙속에 포함된 철분의 양에 따라 a_m^* 의 값이 크게 좌우된다고 볼 수 있다. 흙 "D"는 주성분이 칼슘으로 열린 회색에 가까운 것이므로 일상 쉽게 접하거나 해양에 흔하게 존재하는 것이 아니므로 제외한다면 a_m^* 의 값은 황토의 색상 진하기에 따라 2배 이상 차이가 난다고 볼 수 있다. 흙수 스펙트럼의 모양을 보면 공통적으로 450nm와 600nm를 기점으로 흡수기울기가 변하는 것이 특이하다.

3.5.4.2 무기입자의 비 역산란계수

Fig. (12)는 흙 입자의 비 역산란계수를 나타낸다. 역시 a^* 처럼 종류에 따라 크게 b_b^* 의 차가 난다. 중앙 값은 $0.007 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ 으로 파장에 따라 대체로 감소하는 특성을 보여준다. 문헌조사와 값을 비교하여 보면; mineral 입자에 대한 광특성 연구는 아주 드물다. Bukata et al.(1981)은 캐나다 온타리오 호수에서 반사도 측정을 통하여 비 흡광계수와 비 역산란계수를 얻었다.

비 흡광계수 값은 거의 일치하였으나 파장 440nm에서 본연구는 $0.04 - 0.11 \text{m}^2/\text{g}$ 이며 Bukata는 0.056 을 관측하였다. 그러나 비 역산란계수에서는 엄청난 차이가 벌어진다. 파장 550nm에서 본 연구에서는 $0.005 - 0.01 \text{m}^2/\text{g}$ 이나 Bukata는 $0.05 \text{m}^2/\text{g}$ 로 5 - 10배의 차이를 나타낸다. 이것은 Bukata가 측정된 것은 계산된 총 역산란계수를 모두 미네랄입자로 보았기 때문이며 타 입자나 기타 영향을 고려하지 않았기 때문으로 사료된다. 그러나 어쨌든 이 값은 해수색 simulation을 통하여 반사도를 계산해보면 너무나 높은 반사도 값을 주는 것으로 나타나 타당하지 못한 것으로 보인다.

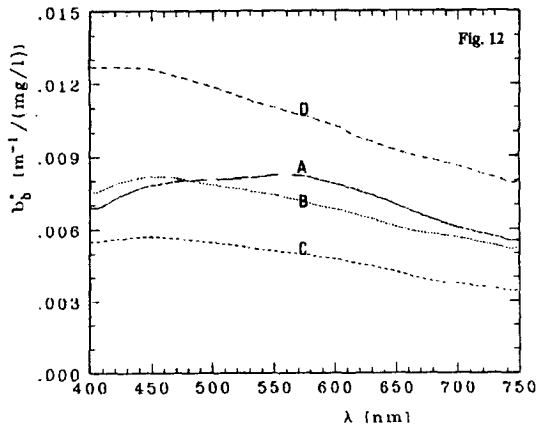
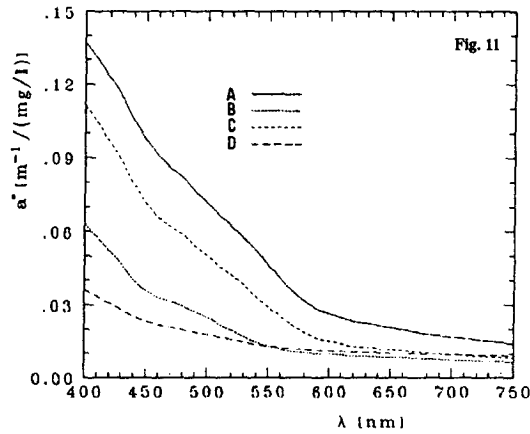


Fig. 11-12. Mineral particle specific-absorption and backscattering coefficient spectrum for 4 different types(The line symbols are same with Fig. 10).

3.5.5 용해 유기물

일반 해양에서 용해 유기물(DOM)의 양은 그렇게 많지 않다. 외국의 해수에서 DOM의 농도가 높은 곳은 일반적으로 Baltic해로 알려져 있다. 우리나라에서는 현재 시화호가 외관상의 해수색으로 볼 때 높은 DOM 농도를 갖는 것으로 추정된다. DOM은 오직 광 흡수에만 영향을 미치며, 산란에는 전혀 영향을 미치지 않는다. 흡광특성은 일반적으로 단파장으로 갈수록 흡광도는 지수 함수적으로 증가한다. Bricquad(1981)에 의하면 파장에 따른 흡광도는 다음과 같이 표현된다.

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp [-0.0149(\lambda - \lambda_0)] \quad (22A)$$

$a(\lambda_0)$ 은 파장 λ_0 에서 측정된 DOM의 흡광계수이다. 즉 한 파장에서만 값을 알면 전 파장에서의 값은 쉽게 구해질 수 있다. 본 모델에서는 $\lambda=400\text{nm}$ 에서 값 $0.01(\text{m}^{-1})$ 로 규격화한 spectrum을 DOM의 비 흡광계수로 사용하였다.

해색 분석 모델 개발
(Inversion problem of ocean reflectance)

4.1 서론

단순히 해수의 반사도로부터 해수중 포함된 물질농도(클로로필, 부유입자, 용해유기물)를 역으로 추출할 수 있을까? 하는 것이 이미 많은 연구자들에 의하여 연구되어왔다(Bukata et al., 1981; Fisher et al., 1986; Sugihara and Kishino, 1988; Sythyendranath et al., 1989). 이것은 해색 원격탐사의 기본으로, 여기서는 반사도의 band수를 제한하지 않으며, 해수의 type도 Case-I, Case-II로 구분하지 않는다는 가정을 하며 오직 underwater problem으로만 제한한다. 그러므로 여기의 모델에서는 위성궤도에서 발생하는 대기영향문제는 전혀 고려하지 않는다.

지금까지의 모든 이러한 반사도의 역 문제인 해양원격탐사는 대부분 반사도(Reflectance) 혹은 해수의 up-welling radiance와 현장 관측치와 다중 회귀분석으로 그 결과가 얻어졌다. 그러므로 지금까지의 접근 방식은 통계적인 방식일 뿐 분석적이고 이론적인 방법은 아니었다. Morel(1980)은 이미 관측 band 수가 분석 대상의 물질의 종류보다 많으면 물질농도는 이론적으로 계산될 수 있다고 하였다. 단 이러한 순수 분석적인 방법을 위하여서는 분석대상 물질(입자)의 광학적인 연구가 먼저 수행되어야 한다. 특히 해수의 광특성을 좌우하는 미생물 입자 및 무기입자에 대한 비 흡광계수(specific absorption coefficient) 및 비 역산란 계수(specific backscattering coefficient)에 관한 연구는 절대적이다. 그 중에서도 식물성플랑크톤입자의 특성 흡수에 관한 연구는 많이 있었다(Morel et al., 1978, Bricquad et al. 1983; Stramski, 1989; Morel and Ahn, 1990). 그러나 생물입자 혹은 무기입자의 역산란이나 다른 무색 생물인 heterotrohe의 광특성에 관한 연구는 전혀 없었으나 Ahn(1990), Morel and Ahn(1991, 1992) 및 Ahn et al.(1993)의 연구로 많은 문제가 해결되었으며 본 연구가 수행될 수 있는 여건이 조성되었다고 볼 수 있다.

4.2 해색 현장 관측

본 연구모델의 입력자료인 해수의 반사도(Reflectance : 고유 해색) 측정

을 위하여 지중해의 빈 영양해서부터 부 영양해인 아프리카 서북부의 용승 (upwelling)해역 그리고 무기입자가 해수의 광특성을 지배하는 지중해의 마르세이유 근해인 'Golf de FOS'에서 해수의 반사도, 총 seston농도, 400nm에서 Yellow substance의 흡광계수 그리고 bacteria의 cell density가 측정이 되었다. 해수반사도는 under water spectrometer(Bauer & Ivanoff, 1970)와 LICOR-1800UW(Fig. 13)를 사용하여 350nm에서 850nm까지 측정 하였으나 모델에 사용한 값의 범위는 400 - 700nm이다. 그리고 측정 파장간격은 2nm 이나 5nm 간격으로 Data를 변환하였다.

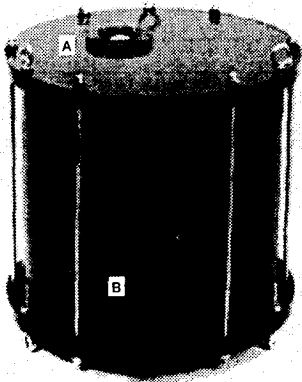


Fig 13. Underwater spectro-irradiance meter

반사도를 위한 관측은 우선 갑판 위에서 downwelling irradiance(E_d)를 측정하고 이어서 바로 표면(1m 수심), 5, 10, 15, 20, 30, 40m의 수심에서 Upwelling irradiance(E_u)를 측정하였다. 여기서 말하는 해수의 반사도는 엄격히 표현하여 해수의 skin surface 바로 아래에서 얻어지는 반사도 $R(\lambda, 0^-)$ 값을 의미한다. 수식적인 정의는 다음과 같다.

$$R(\lambda, 0^-) = \frac{E_u(\lambda, 0^-)}{E_d(\lambda, 0^-)} \quad (23)$$

그리고 갑판에서 관측한 $E_d(\lambda, 0^+)$ 의 값은 해수에 들어가면서 해수표면의 공기-물의 Fresnel effect에 의하여 약 2.5%의 감쇠 효과가 있다. 즉,

$$E_d(\lambda, 0^-) = 0.975 E_d(\lambda, 0^+) \quad (24)$$

위에서 $E_u(\lambda, 0^-)$ 는 실제 관측이 불가능하므로 수심 1m 혹은 5m에서 관측한 값과 올라오는 광에 대한 광 감쇠 계수(K_u)를 이용하여 역으로 추산하는 방법밖에 없다. 우선 K_u 의 정의는 다음과 같다.

$$K_u(\lambda) = \frac{1}{Z_2 - Z_1} [\log_e E_u(\lambda, Z_1) - \log_e E_u(\lambda, Z_2)] \quad (25)$$

여기서 Z_1 과 Z_2 는 5m - 10m, 10m - 15m, 5m - 15m를 말하며, 3개의 수심에서 K_u 를 계산하여 평균값을 이용하였다. 그리고 $E_u(\lambda, 0^-)$ 는 다음과 같이 계산되었다.

$$E_u(\lambda, 0^-) = E_u(\lambda, 10m) \exp(K_u(\lambda) \cdot 10m) \quad (26)$$

4.3 기본 이론

순수 해수의 색깔은 짙은 남청색으로써 전적으로 해수자신의 광흡수와 산란에 좌우된다. 다시 말하면, 해수의 광 특성은 가시영역(400 - 700 nm)에서만 본다면 Blue인 단파장 영역 방향으로서는 산란이 증가하며 흡수는 감소하게 된다. 이로 인하여 물위에서 본 해수의 색깔은 400 nm에서 신호의 크기가 가장 최대를 이루며 장파장은 거의 물 덩이에 흡수되어 버린다. 이런 순수 해수의 색깔은 대서양의 Sargasso 바다와 같은 Oligotrophic 해수에서 쉽게 관찰된다.

Chlorophyll 농도가 높은 일반 연안해역에서는 해수중의 부유 생물입자의 흡수에 의하여 400nm와 600nm대의 광이 대단히 미약하고 상대적으로 550nm 부근의 광이 가장 세게 반사됨에 따라 해수의 빛은 점차 녹색으로 변하여 간다. 반면 부유 무기질 알갱이가 많이 있으면 560 - 570nm를 중심으로 전 파장에서 반사도가 세어 탁한 회색에서 짙은 황색을 띠게 된다. 그러나 일반적으로 해수의 색깔이라 함은 외관상의 색으로써 이는 하늘의 상태 아침, 저녁에 따라 변하게 되므로 해수색 spectrum이 remote sensing의 직접적인 분석자료가 될 수 없으며 최소한 2개 파장대의 비 값을 사용하거나 혹은 입사된 광 스펙트럼에 대한 숫자 나오는 해수광의 비 값 즉, 해수의 반사도 자료가 사용된다. 그러므로 해수의 고유한 색깔(Reflectance)은 다음과 같이 정의되어 진다.

$$R(\lambda) = \frac{E_{\uparrow}(\lambda)}{E_{\downarrow}(\lambda)} \quad (27)$$

위 식에서 $E_{\downarrow}(\lambda)$ 와 $E_{\uparrow}(\lambda)$ 는 각각 해수표면에서의 입사되는 광과 해면을 솟아 나오는 광량 ($W m^{-2} nm^{-1}$) spectrum을 나타낸다. 다시 말하여 이들의 광량비 값을 해수의 “반사도(Reflectance)”라고 하며 이는 표면해수에서의 광의 분포특성에 따라 변하지 않는 고유한 해수의 색깔이라 정의되어진다. 해수에 의한 반사 spectrum은, 일반적인 물체의 표면반사가 아니고 물덩이에 의한 반사이므로, 해수중의 물질의 양과 질에 관한 정보를 갖게 된다.

Morel & Prieur(1976), Prieur and Morel(1977)는 무한한 깊이의 균질의 해수에서 반사도 $R(\lambda)$ 는 매질의 광 고유특성인 흡수와 역산란(backscattering) 계수로써 다음과 같이 표현됨을 광자의 “Successive

method"로 밝혔으며, 이는 Kirk(1983)의 Monte Carlo simulation에 의하여 재확인되었다.

$$R(\lambda) = 0.33 \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)} \quad (28)$$

그리고

$$b_b(\lambda) = \sum_i b_{b_i}(\lambda)$$

$$a(\lambda) = \sum_i a_i(\lambda)$$

위 식에서 $b_b(\lambda)$ 는 매질 성분전체(개개 성분 i ; 해수, 입자 등)에 의한 총 역산란 계수(m^{-1}) spectrum이며, $a(\lambda)$ 역시 총 흡광계수(m^{-1})이다. 순수 해수의 광학적 성질은 이미 잘 알려져 있으므로 해수의 색깔 변화는 전적으로 해수중의 입자의 광학적 성질(absorption 과 back-scattering)에 따라 좌우된다. 그리고 상수 "0.33"은 태양고도, 해수중의 입자의 size 분포에 의하여 영향을 받으며 조금의 변화가 있을 수 있으나 $R(\lambda)$ 에 미치는 영향은 5%이내로 추산되어졌다. 현재 이 식은 Ocean Color Remote Sensing의 대표적인 표현으로 쓰여지고 있다.

결국, 위성으로부터 측정된 해수의 반사도(R)로부터 Eq. (28)에 의하여 역으로 매질의 흡광계수 역산란계수를 역추정을 하는 것(Inversion of Reflectance)이 본 연구 모델이론이 된다. 얻어진 입자들의 광고유 특성인 흡광계수(a)로부터 해수중 물질농도를 추정하기 위해서는 마지막으로 흡광계수와 물질농도의 관계가 밝혀져야 할 것이다. 여기서 단위물질 농도 당 흡광계수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$a_i(\lambda)^* = a_i(\lambda) / \langle i \rangle \quad (29)$$

위에서 $\langle i \rangle$ 는 성분물질 i 의 해수중 농도(mg/m^3)이며, $a_i^*(\lambda)(m^2 mg^{-1})$ 는 i 입자물질의 비 흡광계수(specific absorption coefficient)라고 부른다.

역산란계수에 대하여서도 동일한 방법으로 비 역산란계수를 구할 수 있다.

$$b_{b_i}(\lambda)^* = b_{b_i}(\lambda) / \langle i \rangle \quad (30)$$

위에서 본 바와 같이 해수내의 한 성분물질의 비 흡광계수와 비 역산란 계수의 연구는 해양 remote sensing의 개발에 기본적인 요구사항이다. 그러나 너무 세분된 성분들의 개개 광 특성 연구는 오히려 Error만 크게 증가시킬 수 있으므로 적당히 통합 축소된 몇 개항으로 group화하는 것이 필요하다.

4.4 반사도 역에 의한 모델의 구성과 해(solutions)

앞에서 선정한 물질들을 모델 내에서 단순화된 표현을 하기위하여 다음과 같은 symbol을 사용한다.

- 1) 광합성 색소를 갖는 플랑크톤(phytoplankton) : ph
- 2) 클로로필 색소를 갖지 않는 모든 non-living 입자 : m
- 3) 종속영양체의 생물(size 10 μ m이하의 heterotrophe) : h
- 4) 용해유기물(Dissolved Organic Matter) : dom

Eq. (28)를 각 해양 remote sensing 대상물질 성분별로 구분하여 다시 식을 전개하면;

$$R(\lambda) = 0.33 \frac{b_{b_w}(\lambda) + b_{b_h}(\lambda) + b_{b_{ph}}(\lambda) + b_{b_m}(\lambda)}{a_w(\lambda) + a_h(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_m(\lambda) + a_{dom}(\lambda)} \quad (31)$$

위 식에 주어진 파장 λ 에서 개개 성분의 비 흡광계수(식 29)와 비 역산란계수(식 30)를 결합시키면 아래와 같은 형태의 식으로 변형이 된다.

$$R(\lambda) = 0.33 \frac{X_h B_h(\lambda) + X_{ph} B_{ph}(\lambda) + X_m B_m(\lambda) + C_w(\lambda)}{X_h A_h(\lambda) + X_{ph} A_{ph}(\lambda) + X_m A_m(\lambda) + X_{dom} A_{dom}(\lambda) + D_w(\lambda)} \quad (32)$$

X_h, ph, m, dom 는 각각 성분의 해수 중 농도로써, 구하려는 미지수에 해당한다. 그리고 $B_{h,ph,m,dom}$ 와 $A_{h,ph,m,dom}$ 는 파장에 따른 상수로서 개개 성분의 비 역산란계수(b_b^*)와 비 흡광계수(a^*)를 의미하며 개개 종류에 따른 입자들의 광특성 연구에 의하여 얻어진 값이다. 각각의 Parameters에 대한 설명은 다음과 같다.

- $R(\lambda)$: 파장에 따른 해수의 반사도 값으로 바로 skin surface 해수면 바로 아래에서 값임.

- X_h : Bacteria cell density 10^5 cells/ml에 대한 free living bacteria와 flagellate의 상대적인 cell 수 값이다. 즉 본 연구모델에서 최종 계산될 solution 중 한 값이다. 그리고 다른 heterotrophe의 cell density는 bacteria cell수에 따른다고 가정하였고 flagellate cells density는 bacteria의 1/1000이라 가정하였다.(Sieburth, 1983). 그러므로 X_h 의 값이 2로 얻어지면 실제 bacteria의 수는 2×10^5 cell/ml이 되며, flagellate의 숫자는 200이 된다. ciliate는 해양에서 bacteria와의 관계가 확실하지 못하며 그들의 광학적 영향을 무시 가능하다고 인정되어(Morel and Ahn, 1991) 더 고려하지 않았다.
- $B_h(\lambda)$: 파장에 따른 Bacteria cell density 10^5 cells에 대한 bacteria 및 flagellate의 비역산란계수의 합으로 모델의 입력 값으로 사용된다. 이들의 계산은 Eq. (20)에 의하여 계산되었으며 사용된 개개 변수의 입력 값은 부록으로 실었다.
- $A_h(\lambda)$: 파장에 따른 heterotrophe의 비 흡광계수로 기준은 위와 같다.
- X_{ph} : 본 모델에서 계산될 클로로필 농도 값으로 단위는 [$\mu\text{g}/\ell$]임.
- $B_{ph}(\lambda)$: 파장에 따른 클로로필의 비역산란계수 [$\text{m}^2/\mu\text{g}$]
- $A_{ph}(\lambda)$: 파장에 따른 클로로필의 비 흡광계수 [$\text{m}^2/\mu\text{g}$]
- X_m : 본 모델에서 계산될 부유 무기입자량으로 단위는 [mg/ℓ]임.
- $B_m(\lambda)$: 파장에 따른 무기입자의 비역산란계수 [m^2/mg]
- $A_m(\lambda)$: 파장에 따른 무기입자의 비 흡광계수 [m^2/mg]
- X_{dom} : 본 모델에서 계산될 용해 유기물량으로, 400nm에서의 흡광계수 0.01m^{-1} 의 배수 값으로 무 단위이다. 결국 최종 해는 아래의 $A_{dom}(400\text{nm})$ 과 X_{dom} 의 곱으로 단위는 [m^{-1}] $_{400\text{nm}}$ 임.
- $B_{dom}(\lambda)$: 파장에 따른 용해 유기물량의 비역산란계수로 값은 전파장에서 "zero" 임
- $A_{dom}(\lambda)$: 파장에 따른 용해 유기물량의 비 흡광계수로 400nm에서 0.01 m^{-1} 을 기준으로 한 값이며(의미 없는 값으로 파장에 따른 pattern만이 고려되는 상대적인 값) 파장에 따른 값은 Eq. (22A)을 이용하여 계산되었다. (* 용해 유기물량은 입자상태의 양이 아니므로 단순히 400nm에서의 흡광계수를 DOM 물질량으로 대신하였다)
- $C_w(\lambda)$: 해수의 흡광계수
- $D_w(\lambda)$: 해수의 역산란계수

위에서 파장에 따른 모든 $B_{h,ph,m,dom}$ 와 $A_{h,ph,m,dom}$ 는 이미 앞에서 보았듯이 잘 규명되었다. 다만 $X_{h, ph, m, dom}$ 4가지 값만 알려지지 않았다. 이들의 해를 구하기 위하여서는 여러 가지 방법이 가능하나 다음의 2가지 방법에 의하여 해가 얻어졌다.

4.4.1 Matrix에 의한 일차 선형방정식의 해 (Least square solution to the linear inverse problem)

여기서 연구된 값은 파장 400nm - 700nm의 범위에서 5nm의 간격으로 값이 알려져 있다. 그러므로 Eq. (32)에 의하여 아래와 같은 61개의 일차 선형방정식이 만들어진다. 즉 일차 선형방정식은 61개이고 미지수는 4개이므로 해를 구하는 데는 너무 많은 측정 값이 존재하므로 Over determined linear inverse problem으로 정의된다. 즉 61개의 식을 만족시키는 가장 오차가 작은 4개의 성분 값이 얻어지는 해가된다. 위의 식을 변형하면 다음과 같은 일차 선형식으로 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \alpha_{h1} X_h + \alpha_{ph1} X_{ph} + \alpha_{m1} X_m + \alpha_{cod1} X_{cod} &= \beta_1 \quad (1 = 400nm) \\
 \alpha_{h2} X_h + \alpha_{ph2} X_{ph} + \alpha_{m2} X_m + \alpha_{cod2} X_{cod} &= \beta_2 \quad (2 = 405nm) \\
 \alpha_{h3} X_h + \alpha_{ph3} X_{ph} + \alpha_{m3} X_m + \alpha_{cod3} X_{cod} &= \beta_3 \quad (3 = 410nm) \\
 \dots\dots\dots \\
 \dots\dots\dots \\
 \alpha_{h61} X_h + \alpha_{ph61} X_{ph} + \alpha_{m61} X_m + \alpha_{cod61} X_{cod} &= \beta_{61} \quad (61 = 700nm)
 \end{aligned} \tag{33}$$

여기서 $\alpha_{ji} = R_i A_{ji} - 0.33 B_{ji}$ (j는 각 h, ph, m 과 cod를 나타냄)
 $\beta_i = 0.33 C_i - R_i D_i$

Eq. (33)을 Matrix equation으로 표현하면 ;

$$\begin{bmatrix} \alpha_{h1} & \alpha_{ph1} & \alpha_{m1} & \alpha_{dom1} \\ \alpha_{h2} & \alpha_{ph2} & \alpha_{m2} & \alpha_{dom2} \\ \alpha_{h3} & \alpha_{ph3} & \alpha_{m3} & \alpha_{dom3} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \alpha_{h61} & \alpha_{ph61} & \alpha_{m61} & \alpha_{dom61} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_h \\ X_{ph} \\ X_m \\ X_{dom} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_{61} \end{bmatrix} \tag{34}$$

위 matrix로 표현된 일차 선형방정식의 해(solutions)는 최소자승법의 해와 같다. 해를 구하기 위하여 먼저 $[a]$ 의 역 matrix를 구해야 할 것이다. 그러나 $[a]$ 는 square matrix가 아니므로 inverse matrix는 존재하지 않는다. 그러므로 먼저 $[a]$ 의 행과 열이 바뀐 transpose matrix(a^T)를 $[a]$ 에 곱하여 square matrix를 만든 후 해를 구할 수 있다. 일반적인 해는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[X] = [a^T a]^{-1} [a^T \beta] \quad (35)$$

만약 여기서 이용한 모델이 해수의 반사도를 완벽하게 표현한 것이었다면 Eq. (35)에 의하여 얻어지는 해는 수학적으로 혹은 실제 값으로도 전혀 문제가 없을 것이다. 우선은 여기의 모델이 완벽하다고 가정하여 얻어진 해는 원칙적인 값으로 받아들였다. 그러나 현실적으로 얻어진 반사도(R)가 잘못 관측될 수도 있으며 얻어진 비 흡광계수 및 비 역산란 계수가 해석에 따라 조금씩 차이가 날 수도 있다. 어쨌든 이들 해는 관측된 반사도 값과 모델에 의하여 얻어진 값 사이의 오차를 최소로 하는 수치적인 값을 주게됨으로 현실적으로 불가능한 해를 제공할 수도 있다. 예를 들면 때때로 negative 해가 그런 것이다. 자연 실제 현상으로는 언제나 $X_i \geq 0$ 가 성립해야 한다. 그러나 위의 해를 얻는 방법은 이러한 강제 조건을 부과할 수가 없다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 다음과 같은 강제조건 부과에 의한 해를 얻는 방법이 사용되었다.

4.4.2 한 해가 다른 한 해의 종속인 경우: 강제조건에 의한 해

어떤 경우라도 4개 성분 값이 $X_i \geq 0$ 인 강제조건이 부과되었으며 그리고 하나의 해가 또 다른 해의 함수인 조건을 부과였다. 그 이유는 비록 (-)문제는 해결되어도 광학적으로 비 활성이거나 흡광 스펙트럼의 모양이 타 물질과 유사한 경우 현실적으로 불가능한 너무 크거나 너무 작은 값을 제공할 수 있다. 예를 들면 Bacteria의 cell density (cells/ml)가 10^7 이상이거나 혹은 10^3 이하면 실제 해양에는 존재하지 않는 값이다. 이러한 경우는 일차 선형방정식으로는 해를 얻을 수 없으므로 반복적인 방법(Iteration 혹은 Relaxation method)과 해와 해사이의 함수관계가 사용되었다. 이 방법 해는 다음과 같이 얻어졌다. 여기서 4개의 해 가운데 가장 값이 불안정한 것은 실제 해수에서 이들 물질의 광학적인 역할이 미약한 X_1 의 해(Bacteria의 cell density)와 X_4 (용해유기물)이므로 X_1 과 X_2 의 관계만 적용하였다. 해를 유도하는 방법은 다음과 같다.

우선 위와 같은 Matrix solution으로 1차 해를 구한 후; 만약 X_1 의 해가 negative 값이 발생하였다면 그 해는 "zero"로 상수 입력되고 다시 나머지 최적의 3개항의 해($X_2, 3, 4$)를 다시 Maritix 해로 구한다. 이번에는 $X_2, 3, 4$ 의 해를 고정하고 X_1 의 해를 다시 구한다.

Cole et al.(1988)은 해양에서 클로로필 농도(X_2)와 박테리아의 cell density(N/V : cells/ml)와의 관계를 다음과 같은 경험적인 관계를 유도하였다.

$$[N/V]_{bact} = 0.91 \cdot 10^6 \langle X_2 \rangle^{0.52} \quad (36)$$

위 식을 이용하여 먼저 얻어진 X_2 를 이용하여 $X_1 (= [N/V]/10^5)$ 을 구한다. X_1 은 다시 상수 값으로 입력되면서 다시 $X_2, 3, 4$ 의 값을 구한다. 이러한 과정은 X_1 의 값이 안정된 값을 가질 때까지 반복되었다. 이 방법은 실제 본 모델(4 components만 해당됨)에서 최종적으로 활용된 가장 최적의 방법으로 채택하였다. 물론 이러한 강제적인 조건 부과는 해양반사도의 관측치와 모델에 의한 역 추정치와의 사이에는 오차의 폭은 순수한 수학적인 방법 첫째방법 보다는 더 크질 수 있다. 그러나 우리는 수학적으로 완벽한 해보다는 자연 현상적으로 보다 타당성 있는 해를 채택하게 된 셈이다.

우선 위의 첫째 단일 방법으로 해를 얻어 보았다. 그리고 둘째 방법인 강제조건 부과에 의하여 해를 얻었다. 얻어진 해($X_1, 2, 3, 4$)는 다음과 같이 그 값이 전환되어 진다.

- Bacteria cell density : $X_1 \cdot 10^5$ [cells/ml]
- Chlorophyll 농도 : X_2 [$\mu\text{g/l}$]
- 무기 입자량 : X_3 [mg/l]
- 용해유기물량 : $X_4 \cdot 0.01$ [m^{-1}] (400nm에서의 값)

결과 및 토의
(Results and Discussion)

5.1 해수반사도 현장 측정

Under water spectroirradiance meter로 해수의 Upwelling 및 downwelling irradiance를 측정함에 있어 이상적인 것은 아래-위 방향으로 동시 관측이 수행되어야 한다. 그러나 현재는 양 방향 동시 관측 기기가 생산되지 못하였다(1998년 현재는 상업적으로 생산됨). 그러므로 위 방향과 아래 방향을 관측할 때 하늘의 Light field에 변화가 없어야 한다. 본 관측기기인 LI-COR는 1번 scanning 하는데 약 20초가 소요되었다. (그사이 지나가는 구름이 있으면 관측은 실패됨). 최근에는 Bi-directional spectroradiometer가 생산되었으며 scanning 속도 역시 μ sec로 단축되어 이러한 문제는 없어지게 되었다. Fig. (14)은 해수의 반사도가 관측된 해역의 특성(oligotrophic, turbid, eutrophic water)에 따라 다양한 스펙트럼의 모양(해색)을 보여주고 있다. 북대서양의 빈영양해에서 관측된 스펙트럼은 400 - 500nm 근처에서 강한 광량을 보여주고 있으며, 부영양화 해역에서는 반대로 이 파장대는 약한 광량을 보여주고 있다. 탁수는 상대적으로 550 - 570nm에서 입사광의 6%인 강한 신호를 볼 수 있다. 그러나 공통적인 현상은 해수 중에 어떠한 물질이라도 농도가 증가하면 400 - 500nm 파장대의 신호크기는 항상 감소된다는 사실이다.

5.2 Model에 의한 해색 분석결과

모델에 의하여 분석된 결과는 성격이 다른 3개 해역(맑은 해수, 탁한 해수 및 부영양화 해수) 별로 구분하여 모델의 적합성 여부를 알아보았다. 우선 얻어진 4개의 성분 해를 이용하여 Eq. (32)을 사용, 재구성한 해수 반사도와 관측한 해수의 반사도를 Fig. (15)(빈 영양해 와 부 영양해역), Fig. (16)(탁한 해수)에서 비교하였다. 이 그림으로 얻어진 해가 원래의 반사도로부터 얼마나 충실하게 재현할 수 있는가를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 재구성된 해수의 반사도는 거의 완벽하게 관측치와 일치하는 모습을 보여주고 있다.

그리고 Fig. (17)과 Fig. (18)은 클로로필 농도와 부유물의 농도를 현장 관측치와 모델에 의하여 분석된 값을 서로 비교하였다. 전반적으로 클로로필의 경우 빈 영양해에서 부 영양해, 탁수(Case-II water)를 구분하지 않고 만

족할 만한 결과가 얻어졌다. 그리고 부유 무기물인 경우는 대체로 계산 값이 현장 관측치 보다 낮은 경향의 값을 보여주고 있다. 각 해역별 분석된 해의 특징을 알아보면 다음과 같다.

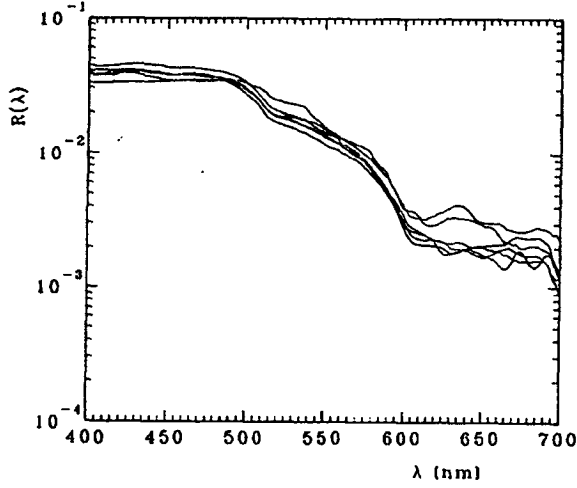


Fig. 14. Reflectances in the Mediterranean(oligotrophic water)

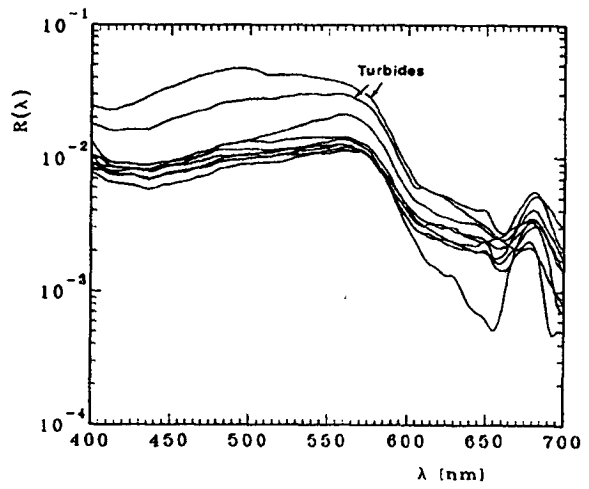


Fig. 14-2. Reflectances of seawater in eutrophic Case-I water(in 2 case turbid water) (upwelling area ; Mauritanie coastal)

5.2.1 Oligotrophic water

Pre-EUMELI(France의 JGOFS)사업의 일환으로 수행된 지중해의 빈 영양해에서 관측된 6개의 spectrum이 분석되었다. 얻어진 해의 특징을 보면 ; 클로로필의 경우 현장 관측 값의 평균치가 $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ 이었으나 모델 계산 값은 0.27 ± 0.07 거의 비슷한 값을 얻을 수 있었다. 비 강제조건으로 얻은 해의 경우 Bacteria cell density가 $1 - 7 \cdot 10^6 \text{ cells}/\text{ml}$ 로 현장 값 보다 약 10 배나 높은 값이 나왔다. 이것은 해수 중에 우리가 고려하지 못한 sub-micron particles의 영향이 이거나 정확치 못한 Radiative transfer 모델의 결과가 아닌가 사료된다. 그리고 이 $0.6\mu\text{m}$ 이하인 입자는 본 model에는 정량화 할 수 없는 미소 입자들로 Bacteria 해와 함께 포함되어 진 것이 아닌가 사료된다. 그러나 강제조건에 의하여 얻은 해는 합당한 수치를 얻을 수 있었다. DOM의 경우는 거의 "zero"에 가까운 값을 얻었다. 이것은 물론 빈 영양해에서 이들의 양이 실제로 무시가능한 정도로 미약한 값인 것으로 추정된다. 그리고 DOM의 경우 타 물질농도에 따른 종속관계를 부여하지 않았기 때문에 앞으로 DOM과 <chl>에 대한 연구도 있으면 도움이 될 수 있을 것이다. 그러나 이러한 Ocean Color Remote Sensing의 분석모델의 발전에 중요한 문제는 보다 정확한 모델의 정립과 해수중 물질의 비 흡수 및 역산관계수를 연구하는 것이다. 그리고 현재까지 규명되지 못한 sub-micro particles(Morel & Ahn, 1991) 및 해수표면에서 바람, 파도 등에 의하여 자연 발생되는 micro air bubble(David Farmer; personal communication)에 의한 역산란 연구가 아주 중요하다고 사료된다.

여하튼 본 모델에서 해를 도출함에 있어 가장 문제가 되는 것은 heterotrophe와 DOM이었다. 물론 그 이유는 이것들의 일반 해양에서 해수 색 변화 미치는 광학적인 활성도 혹은 기여도가 낮기 때문으로 사료된다. 그러나 DOM의 경우 특이한 환경(예, Baltic해)에서는 충분히 안정된 해를 얻을 수 있을 것이다.

미네랄 입자의 경우 불행하게도 현장 지중해의 측정된 입자 농도 값이 없어 모델과 비교하여 볼 수 없었다. 그러나 모델에 의한 유도된 값은 약 $0.1 - 0.2\text{mg}/\text{l}$ 로, 일반적인 연안해역의 총 SS값인 약 $0.5\text{mg}/\text{l}$ 과 비교할 때 상대적으로 맑은 지중해의 값으로 합당하다고 사료된다.

5.2.2 Eutrophic water

부 영양해의 해수반사도가 아프리카 서북부 upwelling 해역에서 Cineca-V 사업에서 관측된 자료를 사용하였다. 이곳은 저층의 풍부한 영양염에 의하여 클로로필 평균 농도가 약 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 이상으로 년 중 생산량이 아주 높은 곳이다. 모델의 결과는 기대한대로 Pre-Eumeli와는 아주 다르게 도출되었다. 여기서 적용된 해는 강제 조건을 부과하지 않은 것이 보다 강제 조건 해보다 보다 현장 값에 가까운 결과를 나타내었다. 분석된 반사도 스펙트럼은 9개로 그 결과는 다음과 같았다.

모델 해(항목)	모델 결과		현장 측정치
	with constraint	without constraint	
Bacteria cell density	$7 \cdot 10^9$ cells/ml	$-1.8 \cdot 10^7$	-
Chlorophyll 농도	$0.6\text{mg}/\text{m}^3$	$1.05\text{mg}/\text{m}^3$	$0.75\text{mg}/\text{m}^3$
Particule mineral	$4\text{mg}/\ell$	$4.2\text{mg}/\ell$	$5.2\text{mg}/\ell$
DOM _{400nm}	0.19	0.21	-

상기 해 가운데 bacteria의 cell density의 경우 안정적이지 못한 값을 나타내는 것은 이들의 다른 3물질 보다 광학적인 역할이 낮기 때문으로 사료된다. 그리고 클로로필의 경우 거의 완벽에 가깝게 현장 값을 재현하였다. DOM의 경우 역시 현장 측정값과 유사한 값을 보였으며, 부유 무기입자량도 대체로 잘 일치하였으나 전반적으로 모델 결과가 현장 값보다 낮은 값을 주었다. 이것은 본 모델에서 사용한 한 성분인 “순수 무기입자”는 실제 현장의 “무기입자 + 생물 detritus”보다 비 역산란계수가 훨씬 높은 값으로 모델에 입력되었기 때문으로 사료된다. 그러므로 본 모델의 개선점으로 “순수 무기입자” 대신에 “무기입자 + 생물 detritus” 성분으로 대치하거나 혹은 무기입자 외에 순수 생물기원 “무색입자”를 하나 더 모델에 추가하여 5 components로 하는 것이 바람직하다는 결과가 나온다.

5.2.3 Turbid water

탁한 해수의 반사도는 프랑스의 마르세이유 앞 바다에서 수행된 Fosber와 FOS-85 사업에서 관측된 자료를 활용하였다(그림 16). 다음은 강제조건과 비 강제조건 두 가지의 경우에 대한 한 해를 비교하여 그 결과를 제시하였다. 이곳 해수의 특징은 아주 탁한 해수로 눈으로 보기에 도 탁하게 보이

는 정도이다. 이 정도에서는 해수의 모든 광학적 특성이 거의 무기입자에 의하여 지배된다고 보아도 되는 경우이다.

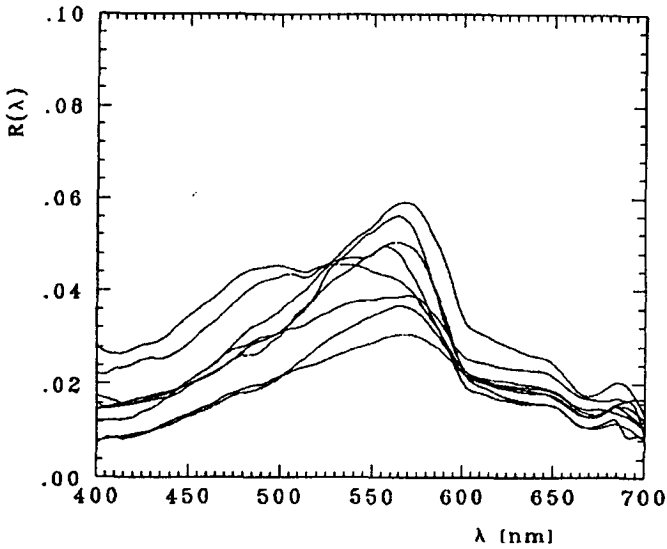


Fig. 14-3. Seawater reflectances measured in turbid water (gulf of FOS and Rhone estuary in France)

모델 해(항목)	모델 결과	현장 측정치
Bacteria cell density	불안정	없음
Chlorophyll 농도	1 - 8mg/m ³	1 - 8mg/m ³
Particule mineral	1 - 4.2mg/ℓ	0.9 - 8mg/ℓ
DOM _{400nm}	0.098 ± 0.02	0.093 ± 0.02

그리고 상당량의 DOM이 녹아있는 것으로 나타난다. 부유 무기입자량은 실측치보다 낮게 분석되었으나 이것은 앞에서 언급한대로 모델에 사용한 무기입자의 비 흡수 및 역산란계수의 값을 실제 현장의 다양한 유기입자의 광특성이 고려되지 못하였기 때문으로 사료된다. 그러나 실제 응용에서는 이러한 문제점은 기술적으로 해결이 가능하다. 탁수의 경우는 무색의 플랑크톤은 강제조건 없이는 사용이 불가능할 정도로 분석 값의 변동이 심하다.

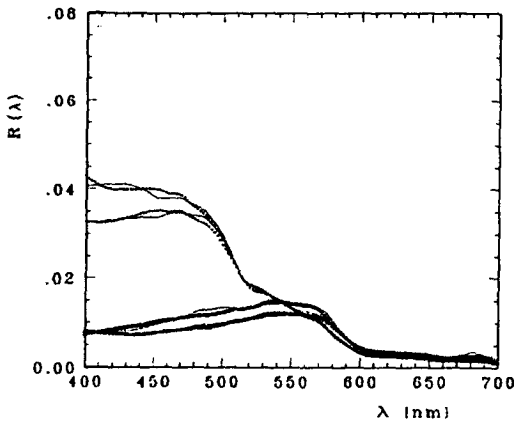


Fig. 15. Comparison of seawater reflectance between the measured and reconstructed by Model in oligotrophic and eutrophic waters.

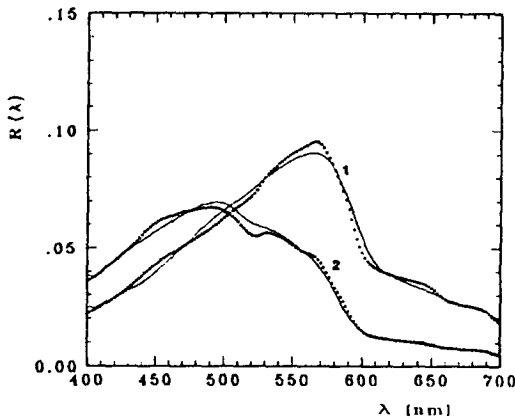


Fig. 16. Same with Fig. 15(turbid water)

에서 역산란계수(b_b)는 ;

$$b_b = 0.3 \langle chl \rangle^{0.62} [2.10^{-3} + 2.10^{-2} (1/2 - 1/4 \log \langle chl \rangle) (550/\lambda)] \quad (37)$$

위 식에서 앞의 부분은 550nm의 클로로필의 경험적인 함수로 주어지는 산란

그러므로 본 4C 모델에서 모든 경우의 해수에서 모든 종류의 해가 만족스럽게 얻어질 수 없다는 것을 보여 주고있다. 어째든 해수의 반사도로부터 Case-II water인 탁수에서도 지금까지는 거의 불가능하였던 클로로필농도 및 SS값이 만족할 만한 값으로 분석될 수 있음은 본 연구의 큰 성과라 할만하다. 탁수에서 해를 얻는 방법에서, 강제조건을 사용할 것인지에 관한 판단은, 얻고자하는 해가 광학적으로 활성이면 강제조건을 사용하지 않아도 좋을 것이고 비 활성이면 강제조건을 사용해야 할 것이다.

5.3 기존 Model과 비교

현재 ocean reflectance 정보로부터 성분물질의 농도를 분석하는 알고리즘은 거의 없고 대부분 radiance를 사용한다. 유일하게 Morel(1988)이 클로로필만을 위한 Reflectance model을 개발하였다. 이 모델은 반 분석적 방법(semi analytical method)으로 다음과 같이 모델화 되었다. 해수

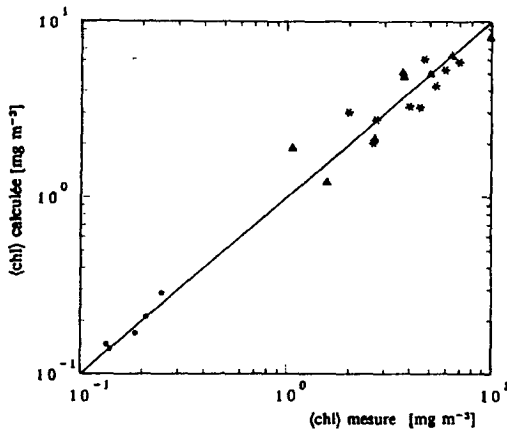


Fig. 17. Chlorophyll concentraion obtained by Model and measured insitu values from the differents type of seawater.(in oligo-, eu- trophic and turbid water)

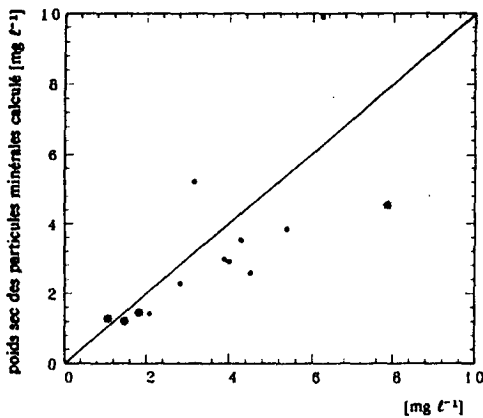


Fig. 18. Comparison of Suspended particle concentration obtained by inversion reflectance model and measured in-situ values from the differents type of seawater.

다시 a와 b는 Eq. (28)에 입력하여 reflectance가 계산되었다. Fig. (19)은 클로로필의 농도가 0.1 - 10mg/m³까지 변할 때 상기 모델에 의하여 얻어진 해수의 반사도이다.

계수이며, 뒤 부분은 산란 계수중 역산란계수가 차지하는 비율 값으로 경험적인 식이다. 흡광계수를 얻기 위하여 다음과 같이 모델화 되었다. 즉, 해수 중 아래방향(downward)의 수직 감쇠계수(K_d)는 물에 의한 감쇠 성분(K_w)과 클로로필에 의한 감쇠 성분의 합으로 표현하였다(이러한 합의 관계는 엄격히 말하여 외관상 광특성에는 적용할 수 없다)

위 식의 $\chi(\lambda)$ 와 $\varepsilon(\lambda)$ 는 현장에서 K와 클로로필 농도사이에 얻어지는 경험적인 계수이다. 수직 감쇠계수는 외관상의 광 특성이므로 고유 광특성인 a로 전환하기 위하여 " $K \mu = a$ "라는 관계식을 사용하였다. 여기서 μ 값은 하늘의 광의 분포상태를 나타내는 상수로 'average consin'으로 불리며 초기값으로 약 0.75의 값을 정한 후 반사도(R)를 구한 후, 다시 R로써 다음과 같이 μ 를 구하였다.

$$\mu = 0.9 \frac{(1-R)}{1+0.23R}$$

이 반복 과정에서 μ 가 Stable한 값에 도달하면 계산은 중단된다. 그리고

$$K_d(\lambda) = K_w(\lambda) + \chi(\lambda) \cdot \langle chl \rangle^{\varepsilon(\lambda)} \quad (38)$$

$$a(\lambda) = 0.75 K_d(\lambda) \quad (39)$$

여기서 생성된 해수의 반사도는 다시 본 연구 모델에 재 입력되어 강제조건 없이 분석되었다. 그 결과는 Fig. (20)에 나타나 있다. 결과는 Morel 모델을 기준 하여, 낮은 농도의 클로로필에서는 약간 높게, $4\text{mg}/\text{m}^3$ 이상에서는 낮게 분석되었다. 한가지 흥미로운 것은 Morel 모델에는 없지만 분석된 부유 무기물량이 <chl>의 값에 따라 약 0.1에서 $0.7\text{mg}/\ell$ 로 변화되었다. 즉 클로로필의 값은 약 100배 변하는데 무기물량은 약 7배정도 밖에 변화되지 않았다. 이것은 Morel의 모델에서 크로로필의 농도가 증가함에 따라 “입자량/<chl>”의 비값이 감소한다는 사실과 잘 일치되고 있다.

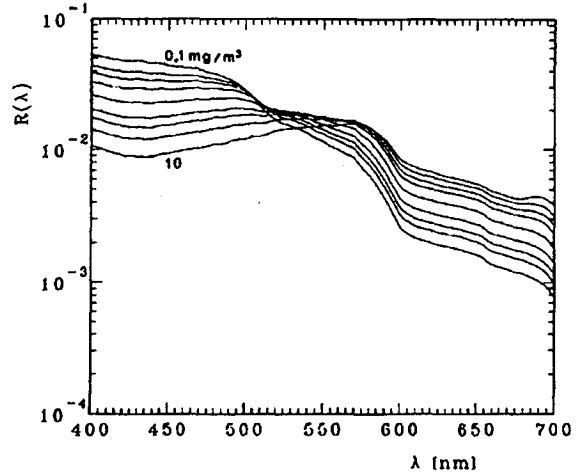


Fig. 19. Ocean reflectance model by Morel(1988) for Case-I water

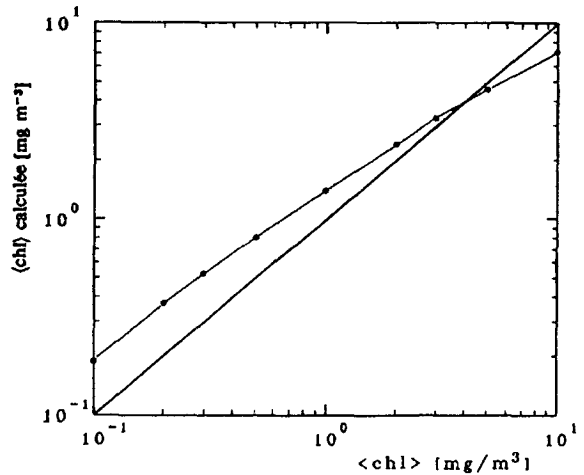


Fig. 20. Chlorophyll concentration comparison between Morel's reflectance model and the inversion reflectance model in this study.

결론(Conclusion)

해양원격탐사를 위한 해색(Ocean color) 분석모델을 개발하였다. 해색 원격탐사는 가시광 영역에서 해수중의 물질 농도를, underwater spectrometer에 의하여 측정된 해색을 분석함으로써, 간접적으로 물질 농도를 알아낼 수 있는 기술이다. 이 기술은 선상 혹은 air-borne에서 사용할 수 있다. 더 나아가 위성에서 관측된 해색을 분석하는데 응용할 수 있다.

현재까지 개발된 해색 분석 기술은 모두 2 - 3개의 bands를 사용하여 경험적인 방법으로 개발되었으나 본 연구에서는 가시광 영역의 61개 bands를 사용하였다. 분석대상 물질은 4개의 성분으로 phytoplankton의 생체량 지수인 클로로필 농도를 포함하여, 마이크로 size의 무색의 동물성 플랑크톤, 무기입자량 그리고 용해유기물로 하였다. 본 분석적인 모델의 개발을 위하여 먼저 이들 물질의 광학적인 특성이 연구되었으며 그리고 해수색 분석 모델이 개발되었다.

모델의 결과는 해양에서 광학적인 활성도가 큰 식물성플랑크톤, 무기입자의 경우 거의 현장 관측치와 유사한 값을 얻을 수 있었다. 그러나 광 활성도가 낮은 무색의 bacteria 및 동물성 플랑크톤이나 용해유기물의 경우 약간 불안정한 값을 보였다. 해양에서 역산란광의 기여도는 박테리아가 식물성플랑크톤보다는 약간 더 높다. 하지만 Bacteria의 해가 보다 불안정한 사실로 보아 여기서 광활성도란 역산란보다는 흠광도가 더 크게 작용하는 것으로 보인다.

전반적으로는 본 분석모델은 현장의 선상이나 air-borne에서 활용하는데는 적합하다고 사료된다. 위성에 의한 원격탐사의 경우 아직까지 hyper-spectral spectro-radiometer가 이제 막 개발되고 있어 당장은 적용하기 어려우나 현재 가까운 시간 내에 위성에 적용 가능하리라 본다.

이 연구의 성과는, 처음으로 성공적으로 분석적인 방법이 Model화 되어 그 가능성을 제시하였으며, 어떠한 해수의 type에 관계 없이 수중의 입자 농도(plankton, 무기입자 와 부쓰르기) 그리고 용해된 Yellow substance의 양의 추정이 가능 하겠습니까. 실제 적용을 위하여 아직 이 방법은 몇몇 parameters가 보완 되어야 하겠으나, 항공기에 의한 국부적인 remote sensing인 경우 즉시 응용 가능하겠으며 위성에 의한 경우는 막대한 Data 저장의 기술적인 문제점

과 그리고 보다 정확하고 순수한 해수광량의 추정이 해결 되어야 할 과제로 남아 있습니다.

참고문헌(References)

- Ahn Y. H., A. Bricaud and A. Morel, 1992. Light backscattering efficiency and related properties of some phytoplankters. *Deep-Sea Res.*, (submitted).
- Aas E., 1984. Influence of shape and structure on light scattering by marine particles. *Univ. Oslo, Inst. Rep. Series*, 53 ; 112 pp.
- Anderson T., T. Fenchel, 1985. Bacterivory by microheterotrophic flagellates in seawater samples. *Limnol. Oceanogr.*, 30 : 198-202.
- Bird D. F. and J. Kalff, 1984. Empirical relationships between bacterial abundance and chlorophyll concentration in fresh and marine waters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 41, 1015-1023.
- Bricaud, A. and A. Morel, 1986. Light attenuation and scattering by phytoplanktonic cells ; a theoretical modeling. *Appl. Opt.*, 25, 571-580.
- Bricaud A. and A. Morel, 1987. Atmospheric corrections and interpretation of marine radiances in CZCS imagery : Use of a reflectance model. *Oceanol. Acta*, 7, 33-50.
- Bricaud A., A. Morel and L. Prieur, 1981. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the U.V. and visible domains. *Limnol. Oceanogr.*, 26, 43-53.
- Bricaud A., A. Morel and L. Prieur, 1983. Optical efficiency factors of some phytoplankters. *Limnol. Oceanogr.*, 28, 816-832.
- Bricaud A., A. L. Bedhomme and A. Morel, 1988. Optical properties of diverse phytoplanktonic species : Experimental results and theoretical interpretation. *J. Plankton Res.*, 10, 851 - 873.
- Bricaud A. and Stramski D., 1990. Spectral absorption coefficient of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea. *Limnol. Oceanogr.*, 35, 562-582.
- Bukata R. P., J. H. Jerome, J. E. Bruton, S. C. Jain and H. H. Zwick, 1981. Optical water quality model of Lake Ontario. 1 : Determination of the optical cross sections of organic and inorganic particulates in Lake Ontario. *Appl. Opt.*, 20, 1696-1703.

- Butler W. L., 1962. Absorption of light by turbid materials. *J. Opt. Soc. Am.*, 52, 292-299.
- Carder K. L. and R. G. Steward, 1985. A remote sensing reflectance model of a red-tide dinoflagellate off west Florida. *Limnol. Oceanogr.*, 30, 286-298.
- Carder K. L., R. D. Tomlinson and G. F. Jr. Beardsley, 1972. A technique for the estimation of indices of refraction of marine phytoplankters. *Limnol. Oceanogr.*, 17, 833-839.
- Cho B. C. and F. Azam, 1990. Biogeochemical significance of bacterial biomass in the ocean's euphotic zone. *Mar. Eco. Prog. Ser.*, 63, 253-259.
- Clark D. K., 1981. Phytoplankton algorithms for the Nimbus-7 CZCS. In "Oceanography from Space", edited by J.R.F. Gower, Plenum Press, New York, pp. 227-238.
- Copin M. G. 1980. Matière en suspension dans les eaux de mer : répartition, composition chimique, origine et évolution. Thèse de d'Etat. Université PARIS-VI. 172 pp.
- Dortch, Q. and T.T. Packard. 1989. Difference in biomass structure between oligotrophic and eutrophic marine ecosystem. *Deep-Sea Res.*, 36(2), 220-230.
- Ducklow H., 1986. Bacterial biomass in warm-core Gulf Stream ring 82-B : mesoscale distribution, temporal changes and production. *Deep-Sea Res.*, 33, 1789-1812.
- Duntley S. Q., 1963. Light in the sea. *J. Opt. Soc. Am. Res.*, 53, 214-233.
- Faust M. A. and K. H. Norris, 1985. In vivo spectrophotometric analysis of photosynthetic pigments in natural populations of phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 30, 1316-1322.
- Fuhrman J. A. and F. Azam, 1980. Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of British Columbia, Antarctica, and California. *Appl. Environ. Microbiol.*, 39(6), 1085-1095.
- Gibbs R. J., 1978. Light scattering from particles of different shapes. *J. Geophys. Res.*, 83, 501-502.
- Gordon H. R. and A. Morel, 1983. Remote assessment of ocean color for

interpretation of satellite visible imagery : a review. Lect. Notes on Coastal and Estuarine Studies. M. Bowman (ed.), Springer-Verlag. 114 pp.

Gordon H.R., O.B. Brown, R.H. Evans, J.W. Brown, R.C. Smith, K.S. Baker and D.K. Clark, 1988. A semi analytic Radiance Model of Ocean Color. J. Geophys. Res., 10909-10924.

Guillard R. R. L. and J. H. Ryther, 1962. Studies of marine planktonic diatoms. I. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula confervacea* (Cleve). Canadian Journal of Microbiology 8, 229-239.

Guillard R. R. L., 1975. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates. In : Culture of marine invertebrate animals. W. L. Smith and M. H. Chanley(Eds.), Plenum Publ. Corp., New York, pp. 29-60.

Haardt H. and H. Maske, 1987. Specific in vivo absorption coefficient of chlorophyll a. Limnol. Oceanogr. 32, 608-619.

Iturriaga R., B. G. Mitchell and D. A. Kiefer, 1988. Microphotometric analysis of individual particle spectra. Limnol. Oceanogr., 33, 128-135.

Iturriaga R. and D. A. Siegel, 1989. Microphotometric characterization of phytoplankton and detrital absorption properties in Sargasso Sea. Limnol. Oceanogr., 34, 1706-1726.

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

Junge C. E., 1963. Air chemistry and radioactivity . Academic Press, 382 pp, New York.

Kiefer D. A., R. J. Olson and W. H. Wilson, 1979. Reflectance spectroscopy of marine phytoplankton. Part 1. Optical properties as related to age and growth rate. Limnol. Oceanogr., 24, 664-672.

Kiefer D. A. and J. B. Soohoo, 1982. Spectral absorption by marine particles of coastal waters of Baja California. Limnol. Oceanogr., 27, 492-499.

Kirk J. T. O., 1975. A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters. 1. General treatment of suspension of living cell. New Phytol. 75: 11-20.

Kirk J.T.O., 1980b. Spectral absorption properties of natural waters : contribution of

the soluble and particulate fractions to light absorption in some inland waters of southeastern Australia. *Aust. J. mar. freshwater Res.*, 31, 287-296.

Kirk J.T.O., 1984. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude. *Limnol. Oceanogr.*, 29, 350-356.

Kishino M., M. Takahashi, N. Okami and S. Ichimura, 1985. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea. *Bull. Mar. Sc.*, 37, 634-642.

Koike I., S. Hara, K. Terauchi and K. Kogure, 1990. Role of sub-micrometer particles in the ocean. *Nature*, 345, 242-244.

Kopelevich, O.V., V.V Rodionov and T.P Stupakova, 1987. Effect of bacteria on optical characteristics of ocean water. *Oceanology*, 27, 6, 696-700 (english translation: UDC 551.463.5+579.843)

Kubelka P., 1947. New contributions to the optics of intensely light-scattering material. *J. Opt. Soc. Am.*, 38, 448-456.

LATIMER P. and E. RABINOWITCH, 1959. Selective scattering of light by pigments in vivo. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 84 428 - 441.

Li, W. K. W. and M. Wood, 1988. Vertical distribution of North atlantic ultraphytoplankton: Analysis by flow cytometry and epifluorescence microscopy. *Deep-Sea Res.*, 1615-1638.

Malone T. C, H.W. Ducklow, 1990. Microbial biomass in the coastal plume of Chesapeake Bay: Phytoplankton - bacterioplankton relationships. *Limnol Oceanogr.* 35, 296-312.

Maske H. and H. Haardt, 1987. Quantitative in vivo absorption spectra of phytoplankton : Detrital absorption and comparison with fluorescence excitation spectra. *Limnol. Oceanogr.*, 32, 620-633.

Meyer R., 1979. Light scattering from biological cells : dependance of backscatter radiation on membrane thickness and refractive index. *Appl. Opt.*, 18 (5), 585-588.

Mitchell B.G., 1987. Ecological implications of variability in marine particulate absorption and fluorescence excitation spectra. Ph. D. dissertation, The University of Southern California, 196 pp.

Mitchell B. G. and D. A. Kiefer, 1988a. Chlorophyll a specific absorption and

fluorescence excitation spectra for light-limited phytoplankton. Deep-Sea Res., 35, 639-663.

Mitchell B. G. and D. A. Kiefer, 1988b. Variability in pigment specific particulate fluorescence and absorption spectra in the northeastern Pacific Ocean. Deep-Sea Res., 35, 665-689.

Morel A., 1973. Diffusion de la lumière par les eaux de mer. Résultats expérimentaux et approche théorique. In : Optics of the sea. AGARD Lect. Ser., 61, 31.1-31.76.

Morel A., 1974. Optical properties of pure water and pure sea water. In : Optical Aspects of Oceanography. N.G. Jerlov and E. Steeman-Nielsen (eds.), Academic Press, 1-24.

Morel A., 1978. Available, usable and stored radiant energy in relation to marine photosynthesis. Deep-Sea Res., 25, 673-688.

Morel A., 1980. In-water and remote measurements of ocean colour. Boundary-Layer Meteorol., 18, 177-201.

Morel A., 1987. Chlorophyll-specific coefficient of phytoplankton : a simplified theoretical approach. Deep-Sea Res., 34, 1093-1105.

Morel A., 1988. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (Case I waters). J. Geophys. Res., 93, C9, 10749--10768.

Morel A., Y. H. Ahn, F. Partensky, D. Vaultot and H. Claustre, 1993. *Prochlorococcus* and *Synechococcus* : a comparative study at their optical properties in relation to their size and pigmentation. J. Mar. Res.(51), 617-649.

Morel A., Y. H. Ahn, F. Partensky, D. Vaultot and H. Claustre, 1993. *Prochlorococcus* and *Synechococcus* : a comparative study at their optical properties in relation to their size and pigmentation. J. Mar. Res.(51), 617-649.

Morel A. and Y. H. Ahn, 1990. Optical efficiency factors of free living marine bacteria : Influence of bacterioplankton upon the optical properties and particulate organic carbon in oceanic water. J. Mar. Res., 48, 145-175.

Morel A. and Y. H. Ahn, 1991. Optics of heterotrophic nanoflagellates and ciliates: A tentative assessments of their scattering role in oceanic waters compared to those of

- bacteria and algal cells. *J. Mar. Res.*, 49, 177-202.
- Morel A. and A. Bricaud, 1981a. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Res.*, 28, 1375-1393.
- Morel A. and A. Bricaud, 1981b. Theoretical results concerning the optics of phytoplankton, with special reference to remote sensing applications. In : *Oceanography from space*, J.F.R. Gower, editor, Marine Science Series. Vol. 13, Plenum Press, New-York, pp 313-327.
- Morel A. and A. Bricaud, 1986. Inherent properties of algal cells including picoplankton : theoretical and experimental results. In : *Photosynthetic Picoplankton*, Canadian Bull. Fish. Aq. Sciences 214, T. Platt and W.K.W.Li (eds.), 521-559.
- Morel A. and H. R. Gordon, 1980. Report of the working group on ocean color, *Boundary Layer Meteorol.*, 18, 343-355.
- Morel A. and L. Prieur, 1975a. "Analyse spectrale des coefficients d'atténuation diffuse, de réflexion diffuse, d'absorption, et de rétrodiffusion pour diverses régions marines". *Centre Rech. Oceanogr., Villefranche-sur-Mer Rapp.* 17, 157 pp.
- Morel A. and L. Prieur, 1976. "Eclaircissements sous marins". In : *Résultats des Campagnes à la mer*. N° 10, CINECA 5-Charcot, 1-256. Publications CNEXO.
- Morel A. and L. Prieur, 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.*, 22, 709-722.
- Neveux, J., V. Daniel, C. Courties and E. Fukai, 1989. Green photosynthetic bacteria associated with the deep chlorophyll maximum of the Sargasso sea. *C.R Acad. Sci. Paris*, t. 308, Série III, 9-14.
- Olson R. J, S. W. Chisholm, E. R. Zettler and E. V. Ambrust, 1990. Pigments, size, and distribution of *Synechococcus* in the North Atlantic and Pacific Oceans. *Limnol. Oceanogr.*, 45-58.
- Osborne B. A. and J. A. Raven, 1986. Growth light and Photon absorption by cells of *Chlamydomonas reinhardtii*, *Dunaliella tertiolecta* (Chlorophyceae, Volvocales), *Scenedesmus obliquus* (Chlorophyceae, Chlorococcales) and *Euglena viridis* (Euglenophyceae, Euglenales). *Br. phycol. J.* 21, 303-313.
- Okami N., M. Kishino, S. Sugihara, N. Takematsu and S. Unoki, 1982. Analysis of Ocean Color Spectra (III). Measurements of optical properties of sea water. *J. Oc.*

Soc. Japan, 38, 362-372.

Platt T., M. Lewis and R. Geider, 1984. Thermodynamics of the pelagic ecosystem : Elementary closure conditions for biological production in the open ocean. p 49-84 in M. J. Fasham (ed.) "Flow of energy and materials in marine ecosystems: Theory and practice. Plenum.

Prieur L. and A. Morel, 1975. "Relations théoriques entre le facteur de réflexion diffuse de l'eau de mer a diverses profondeurs et les caractéristiques optiques (absorption, diffusion)", IAPSO - IGGU XVI General Assembly (Grenoble).

Prieur L. and S. Sathyendranath, 1981. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. *Limnol. Oceanogr.*, 26, 671-689.

Rassoulzadegan, F. and R.W. Sheldon, 1986. Predator-prey interactions of nanozooplankton and bacteria in an oligotrophic marine environment. *Limnol. Oceanogr.*, 31, 1010-1021.

Sathyendranath S. and L. Prieur, 1981. A model of diffuse reflectance and its remote sensing applications, with special reference to coastal ("case 2") waters. In : A Collection of extended abstracts of papers presented at the symposium on the radiation transfer in the oceans and remote sensing of oceanproperties, IAMAP Third scientific assembly, Hamburg, August 1981, pp 83-85.

Sathyendranath S., L. Prieur and A. Morel, 1989. A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in costal waters. *Int. J. Remote Sensing*, 10 (8), 1373-1394.

Sheldon R. W. and F. Rassoulzadegan, 1987. A method for measuring plankton production by particle counting. *Marine Microbial Food Webs*, 2, 29-44.

Siegel D. A., T. D. Dickey, L. Washburn, M. K. Hamilton and B. G. Mitchell, 1989. Optical determination of particulate abundance and production variation in the oligotrophic ocean. *Deep-Sea Res.*, 36, 211-222.

Smith, R.C. and K.S. Baker, 1978. The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. *Limnol. Oceanogr.*, 23, 247-259.

Smith R. C and W. H. Wilson, 1981. "Ship and satellite bio-optical research in the California Bight," in *Oceanography from Space*, edited by J.R.F. Gower, Plenum Press, New York, 281-294.

Spinrad R. W., H. Glover, B. B. Ward, L.A. Codispoti and G. Kullenberg, 1989. Suspended particles and bacterial maxima in Peruvian coastal waters during a cold water anomaly. *Deep-Sea Res.*, 36, 715-733.

Stramski D. and D. A. Kiefer, 1990. Optical properties of marine bacteria. *Proc. Ocean Optics X. SPIE 1302*, 250-268.

Stramski D. and D. A. Kiefer, 1991. Light scattering by microorganisms in the open ocean. ???,

Stramski D. and A. Morel, 1990. Optical properties of photosynthetic picoplankton in different physiological states as affected by growth irradiance. *Deep-Sea Res.*, 37, 245-266.

Stramski D., A. Morel and A. Bricaud, 1988. Modeling the light attenuation and scattering by spherical phytoplanktonic cells : a retrieval of bulk refractive index. *Appl. Opt.*, 27, 3954-3957.

Sturm B., 1981. "Ocean color remote sensing and the retrieval of surface chlorophyll in coastal waters using the Nimbus-7 CZCS". In : *Oceanography from Space*, edited by J.R.F. Gower, Plenum Press, New York, pp 267-280.

Sugihara S. and M. Kishino, 1988. An algorithm for estimating the water quality parameters from irradiance just below the sea surface. *J. Geophys. Res.*, 93, 10857-10862.

Sugihara S., M. Kishino and N. Okami, 1982. Back-scattering of light by particles suspended in water. *Sci. Papers of the Institute of Physical and Chemical Research (I.P.C.R)*, 76, 1-8.

Trýper 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, 1255-1256.

Van De Hulst H.C., 1957. *Light scattering by small particles*. Wiley (ed.), New-York, 470 pp.

Yentsch C.S., 1962. Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean. *Limnol. Oceanogr.*, 7, 207-217.

Zaneveld J.R.V. and H. Pak, 1973. Method for the determination of the index of refraction of particles suspended in the ocean. *J. Opt. Soc. Am.*, 63, 321-324.

부록 : Ocean color 모델에 사용된 해수물질의 광특성 값

λ	a_{water}	b_{water}	λ	a^*_{ph}	$b^*_{b\ ph}$	λ	a^*_h	$b^*_{b\ h}$
400	0.01800	0.00758	400	0.03942	0.000279	400	0.000887	0.000029
405	0.01749	0.00720	405	0.03946	0.000278	405	0.000876	0.000029
410	0.01700	0.00678	410	0.04032	0.000276	410	0.000856	0.000029
415	0.01652	0.00642	415	0.04173	0.000274	415	0.000828	0.000029
420	0.01600	0.00608	420	0.04293	0.000273	420	0.000792	0.000029
425	0.01542	0.00581	425	0.04393	0.000274	425	0.000755	0.000028
430	0.01500	0.00550	430	0.04475	0.000276	430	0.000716	0.000028
435	0.01495	0.00523	435	0.04515	0.000279	435	0.000672	0.000028
440	0.01500	0.00500	440	0.04477	0.000282	440	0.000635	0.000028
445	0.01491	0.00478	445	0.04355	0.000287	445	0.000598	0.000028
450	0.01500	0.00453	450	0.04194	0.000292	450	0.000564	0.000028
455	0.01554	0.00439	455	0.04048	0.000297	455	0.000533	0.000028
460	0.01600	0.00419	460	0.03922	0.000302	460	0.000504	0.000028
465	0.01593	0.00400	465	0.03789	0.000308	465	0.000476	0.000027
470	0.01600	0.00382	470	0.03630	0.000315	470	0.000453	0.000028
475	0.01688	0.00360	475	0.03466	0.000323	475	0.000432	0.000028
480	0.01800	0.00349	480	0.03328	0.000330	480	0.000413	0.000028
485	0.01880	0.00332	485	0.03223	0.000337	485	0.000395	0.000028
490	0.02000	0.00320	490	0.03121	0.000343	490	0.000378	0.000028
495	0.02245	0.00310	495	0.02971	0.000350	495	0.000362	0.000028
500	0.02600	0.00297	500	0.02742	0.000356	500	0.000346	0.000028
505	0.03041	0.00282	505	0.02455	0.000361	505	0.000331	0.000028
510	0.03600	0.00270	510	0.02158	0.000366	510	0.000316	0.000028
515	0.04264	0.00260	515	0.01897	0.000371	515	0.000302	0.000027
520	0.04800	0.00248	520	0.01682	0.000374	520	0.000291	0.000027
525	0.05016	0.00234	525	0.01510	0.000377	525	0.000278	0.000027
530	0.05100	0.00227	530	0.01368	0.000380	530	0.000267	0.000027
535	0.05290	0.00220	535	0.01251	0.000382	535	0.000258	0.000027
540	0.05600	0.00212	540	0.01151	0.000382	540	0.000250	0.000027
545	0.05990	0.00203	545	0.01062	0.000383	545	0.000242	0.000027
550	0.06400	0.00193	550	0.00978	0.000382	550	0.000235	0.000027
555	0.06778	0.00186	555	0.00901	0.000379	555	0.000231	0.000027
560	0.07100	0.00180	560	0.00838	0.000376	560	0.000228	0.000026
565	0.07397	0.00175	565	0.00782	0.000372	565	0.000225	0.000026
570	0.08000	0.00168	570	0.00731	0.000367	570	0.000222	0.000026
575	0.09195	0.00162	575	0.00684	0.000361	575	0.000218	0.000026
580	0.10800	0.00157	580	0.00641	0.000354	580	0.000215	0.000026
585	0.12734	0.00153	585	0.00606	0.000347	585	0.000213	0.000026
590	0.15700	0.00148	590	0.00575	0.000341	590	0.000211	0.000026
595	0.20119	0.00144	595	0.00550	0.000335	595	0.000209	0.000026
600	0.24500	0.00141	600	0.00533	0.000329	600	0.000207	0.000026
605	0.27342	0.00136	605	0.00529	0.000324	605	0.000206	0.000026
610	0.29000	0.00132	610	0.00542	0.000318	610	0.000205	0.000026
615	0.30165	0.00127	615	0.00565	0.000314	615	0.000204	0.000026
620	0.31000	0.00124	620	0.00590	0.000311	620	0.000203	0.000026
625	0.31548	0.00120	625	0.00613	0.000311	625	0.000202	0.000026
630	0.32000	0.00116	630	0.00629	0.000315	630	0.000201	0.000026
635	0.32516	0.00113	635	0.00638	0.000321	635	0.000200	0.000026
640	0.33000	0.00109	640	0.00643	0.000330	640	0.000199	0.000025
645	0.33525	0.00106	645	0.00657	0.000340	645	0.000199	0.000025
650	0.35000	0.00103	650	0.00707	0.000350	650	0.000198	0.000025
655	0.38014	0.00100	655	0.00835	0.000362	655	0.000197	0.000025
660	0.41000	0.00097	660	0.01064	0.000380	660	0.000197	0.000025
665	0.42402	0.00094	665	0.01358	0.000416	665	0.000196	0.000025
670	0.43000	0.00091	670	0.01613	0.000479	670	0.000196	0.000025
675	0.43854	0.00088	675	0.01695	0.000560	675	0.000195	0.000025
680	0.45000	0.00086	680	0.01535	0.000630	680	0.000193	0.000025
685	0.46551	0.00083	685	0.01175	0.000648	685	0.000192	0.000025
690	0.50000	0.00080	690	0.00768	0.000605	690	0.000191	0.000025
695	0.56566	0.00078	695	0.00455	0.000527	695	0.000190	0.000025
700	0.65000	0.00076	700	0.00273	0.000456	700	0.000189	0.000025

a^*_h , $b^*_{b\ h}$ 의 값은 bacteria cell density 10^5 cells/ml 기준으로 한 bacteria와 flagellates의 합 의 값 [m^{-1}]

λ	a_m^*	b_m^*	λ	Q_a bact	Q_{bb} bact	λ	Q_a flag	Q_{bb} flag
400	0.06301	0.00752	400	0.02455	0.00102	400	0.06524	0.000297
405	0.06048	0.00753	405	0.02598	0.00101	405	0.06640	0.000296
410	0.05786	0.00761	410	0.02701	0.00101	410	0.06707	0.000296
415	0.05477	0.00774	415	0.02746	0.00100	415	0.06672	0.000296
420	0.05208	0.00785	420	0.02623	0.00100	420	0.06507	0.000298
425	0.04938	0.00793	425	0.02498	0.00099	425	0.06267	0.000300
430	0.04639	0.00800	430	0.02368	0.00099	430	0.06001	0.000303
435	0.04332	0.00806	435	0.02222	0.00098	435	0.05746	0.000306
440	0.04000	0.00810	440	0.02095	0.00098	440	0.05505	0.000308
445	0.03759	0.00813	445	0.01970	0.00097	445	0.05260	0.000309
450	0.03584	0.00814	450	0.01859	0.00097	450	0.05021	0.000311
455	0.03427	0.00815	455	0.01754	0.00097	455	0.04797	0.000315
460	0.03320	0.00815	460	0.01658	0.00096	460	0.04590	0.000318
465	0.03229	0.00813	465	0.01565	0.00096	465	0.04383	0.000319
470	0.03139	0.00810	470	0.01489	0.00096	470	0.04192	0.000319
475	0.03049	0.00806	475	0.01418	0.00097	475	0.04021	0.000321
480	0.02943	0.00801	480	0.01357	0.00097	480	0.03838	0.000323
485	0.02839	0.00796	485	0.01298	0.00097	485	0.03659	0.000326
490	0.02732	0.00791	490	0.01242	0.00097	490	0.03489	0.000329
495	0.02611	0.00786	495	0.01190	0.00097	495	0.03351	0.000331
500	0.02487	0.00782	500	0.01137	0.00096	500	0.03230	0.000332
505	0.02356	0.00778	505	0.01085	0.00096	505	0.03102	0.000333
510	0.02216	0.00774	510	0.01035	0.00096	510	0.02991	0.000334
515	0.02083	0.00770	515	0.00990	0.00096	515	0.02888	0.000335
520	0.01966	0.00766	520	0.00952	0.00096	520	0.02798	0.000338
525	0.01841	0.00762	525	0.00910	0.00095	525	0.02710	0.000339
530	0.01708	0.00758	530	0.00874	0.00095	530	0.02622	0.000340
535	0.01599	0.00754	535	0.00844	0.00094	535	0.02547	0.000340
540	0.01506	0.00750	540	0.00816	0.00094	540	0.02479	0.000341
545	0.01416	0.00745	545	0.00790	0.00093	545	0.02410	0.000342
550	0.01333	0.00740	550	0.00769	0.00093	550	0.02342	0.000343
555	0.01265	0.00735	555	0.00754	0.00093	555	0.02284	0.000344
560	0.01200	0.00729	560	0.00744	0.00093	560	0.02241	0.000345
565	0.01143	0.00723	565	0.00735	0.00092	565	0.02210	0.000346
570	0.01099	0.00716	570	0.00724	0.00092	570	0.02186	0.000347
575	0.01068	0.00710	575	0.00713	0.00092	575	0.02157	0.000349
580	0.01036	0.00704	580	0.00704	0.00092	580	0.02117	0.000351
585	0.01010	0.00698	585	0.00696	0.00092	585	0.02082	0.000353
590	0.00998	0.00692	590	0.00689	0.00092	590	0.02040	0.000354
595	0.00985	0.00687	595	0.00683	0.00091	595	0.02003	0.000356
600	0.00979	0.00681	600	0.00679	0.00091	600	0.01969	0.000356
605	0.00964	0.00675	605	0.00676	0.00091	605	0.01940	0.000357
610	0.00946	0.00668	610	0.00675	0.00090	610	0.01913	0.000357
615	0.00929	0.00662	615	0.00671	0.00090	615	0.01887	0.000358
620	0.00910	0.00655	620	0.00667	0.00090	620	0.01856	0.000358
625	0.00908	0.00648	625	0.00663	0.00089	625	0.01827	0.000358
630	0.00898	0.00641	630	0.00660	0.00089	630	0.01802	0.000358
635	0.00884	0.00634	635	0.00658	0.00089	635	0.01789	0.000358
640	0.00878	0.00626	640	0.00657	0.00089	640	0.01778	0.000359
645	0.00875	0.00619	645	0.00654	0.00089	645	0.01779	0.000360
650	0.00873	0.00612	650	0.00652	0.00089	650	0.01760	0.000360
655	0.00860	0.00605	655	0.00651	0.00088	655	0.01746	0.000361
660	0.00843	0.00599	660	0.00651	0.00088	660	0.01737	0.000362
665	0.00831	0.00594	665	0.00648	0.00088	665	0.01729	0.000363
670	0.00817	0.00589	670	0.00645	0.00087	670	0.01717	0.000365
675	0.00795	0.00585	675	0.00642	0.00087	675	0.01706	0.000366
680	0.00781	0.00581	680	0.00636	0.00087	680	0.01687	0.000366
685	0.00777	0.00578	685	0.00634	0.00087	685	0.01659	0.000368
690	0.00768	0.00574	690	0.00631	0.00087	690	0.01642	0.000369
695	0.00755	0.00571	695	0.00628	0.00087	695	0.01625	0.000370
700	0.00740	0.00566	700	0.00624	0.00087	700	0.01603	0.000372