

황해 중부 연안 해역에서의 해색센서용 하향 확산 감쇠계수 및 수중시계 추정 알고리즘 개발

민지은*** · 유주형*† · 안유환* · 이규성**

*한국해양연구원 해양위성연구단, **인하대학교 지리정보공학과

Development $K_d(\lambda)$ and Visibility Algorithm for Ocean Color Sensor Around the Central Coasts of the Yellow Sea

Jee-Eun Min***, Joo-Hyung Ryu*†, Yu-Hwan Ahn*, and Kyu-Sung Lee**

*Ocean Satellite Research Group, Korean Ocean Research & Development Institute (KORDI)

**Department of Geoinformatic Engineering, Inha University

Abstract : The diffuse attenuation coefficient for down-welling irradiance ($K_d(\lambda)$), which is the propagation of down-welling irradiance at wavelength λ from surface to a depth (z) in the ocean, and underwater visibility are important optical parameters for ocean studies. There have been several studies on $K_d(\lambda)$ and underwater visibility around the world, but only a few studies have focused on these properties in the Korean sea. Therefore, in the present study, we studied $K_d(\lambda)$ and underwater visibility around the coastal area of the Yellow Sea, and developed $K_d(\lambda)$ and underwater visibility algorithms for ocean color satellite sensor. For this research we conducted a field campaign around the Yellow Sea from 19 ~ 22 September, 2006 and there we obtained a set of ocean optical and environmental data. From these datasets the $K_d(\lambda)$ and underwater visibility algorithms were empirically derived and compared with the existing NASA SeaWiFS $K_d(\lambda)$ algorithm and NRL (Naval Research Laboratory) underwater visibility algorithm. Such comparisons over a turbid area showed small difference in the $K_d(\lambda)$ algorithm and constants of our result for underwater visibility algorithm showed slightly higher values.

Key Words : Diffuse attenuation coefficient for down-welling irradiance ($K_d(\lambda)$), Underwater visibility, Yellow Sea, Case-II water.

요약 : 해수 속으로 입수된 하향 태양에너지 (down-welling irradiance)가 수심이 깊어짐에 따라 확산 소산되는 정도를 나타내는 하향 확산 감쇠계수 (Diffuse attenuation coefficient of down-welling irradiance, $K_d(\lambda)$)와 해수 속에서의 가시거리를 나타내는 수중시계는 수중에서의 광학적 성격을 나타내는 중요한 지수이다. 이러한 $K_d(\lambda)$ 및 수중시계에 대한 많은 연구가 세계적으로 여러 해역에 대해 수행되어 왔지만 우리나라 연안 해역을 대상으로 하는 연구는 매우 적은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 황해 중부해역을 대상으로 $K_d(\lambda)$ 및 수중시계를 관측하였고, 해색위성용 $K_d(\lambda)$ 및 수중시계 알고리즘을 개발하였다. $K_d(\lambda)$ 및 수중시계 관측을 위하여 2006년 9월 19 ~ 22일, 4일 동안 황해 중부해역에서 현장관측을

2007년 7월 23일 접수 ; 2007년 7월 31일 수리.

† 교신저자: 유주형(jhryu@kordi.re.kr)

실시하였으며, 총 39개 정점에서 해양 광학적 자료와 해양 환경적 자료를 획득하였다. 획득된 자료를 이용하여 경험적 방법으로 $K_d(\lambda)$ 와 수중시계 알고리즘을 개발하였으며, 개발된 알고리즘들은 각각 기존의 대양의 자료를 이용하여 개발된 SeaWiFS 해석 센서용 $K_d(\lambda)$ 알고리즘과 NRL (Naval Research Laboratory)에서 개발된 SeaWiFS 센서용 수중시계 알고리즘과 비교하여 보았다. $K_d(\lambda)$ 알고리즘의 경우는 탁도가 높은 해역 값에서 약간의 차이를 보였으며, 수중시계 알고리즘의 경우 NRL의 알고리즘에 비해 약간 높은 계수 값을 얻었다.

1. 서론

하향 확산 감쇠계수 (Diffuse attenuation coefficient for down-welling irradiance, $K_d(\lambda)$)는 해수 속으로 입수된 하향 태양에너지 (down-welling irradiance)가 수심이 깊어짐에 따라 확산 소산되는 정도를 나타낸다. 수중에서의 $K_d(\lambda)$ 에 대한 연구는 수직적으로 분포하는 해수에 대한 광학적 구조를 표현하는 기초를 제공하기 때문에 해양 분야의 연구에서 매우 중요한 역할을 한다. 뿐만 아니라 상층 해양의 열전달, 수중에서의 광합성 및 다른 생물학적 과정에 대한 연구, 해양 일차 생산력 추정, 대양 및 연안에서의 탁도 추정 연구 등의 보조 자료로 이용됨으로서 해양원격탐사를 포함하는 다양한 해양 연구에 매우 중요한 요소이다(Lee *et al.* (2005)). 수중시계 또한 수중에서의 광량에 따른 상대적인 값으로 연안 환경을 나타내는 중요한 지표로서, 잠수정이나 잠수부의 시야 확보 측면에서 물속에서의 가시거리를 결정하는 데에 도움을 준다. 특히 군사적으로 군사 전략 수립이나 군사적 의사 결정 등의 중요한 정보가 될 수 있다(Museler (2003)).

수중에서의 광학적 특성을 나타내는 대표적인 지수인 $K_d(\lambda)$ 에 대한 많은 연구가 세계적으로 오래 전부터 수행되어 왔다. Kirk (1986)는 클로로필이 거의 없는 맑은 해양, 클로로필의 양이 많은 연안의 용승해역 그리고 육지의 담수에서의 $K_d(\lambda)$ 값을 비교하는 연구를 수행하였다. Zaneveld *et al.* (1981)은 $K_d(\lambda)$ 와 상층부 해양에서의 열전달 연구를 하였고, Lewis *et al.* (1990)은 적도 근처의 태평양을 대상으로 위성으로부터 얻어진 투명도 값과 상층부 열에너지를 비교함으로써 가시광 영역의 태양 에너지가 상층부의 혼합층으로 다량 침투하여 영향을 미치는 것을 알아내었다. Morel and Antonie (1994)는 대양을 대상으로 상층부에서의 태양 에너지 흡수와 열전달 효율이 클로로필 농도 값과 높은

상관관계가 있음을 발견하였고, Chang and Dickey (2004)는 연안 상층부 태양에너지 전달이 클로로필과 용존유기물의 농도에 영향을 받는다는 것을 발견하였다. $K_d(\lambda)$ 와 생물적 현상의 상관관계에 대한 연구로서 Platt *et al.* (1988), Sathyendranath *et al.* (1989), Marra *et al.* (1995), McClain *et al.* (1996) 등은 수심에 따른 수직적 클로로필의 생체량을 추정하는 데에 $K_d(\lambda)$ 값을 이용하였다. 이처럼 $K_d(\lambda)$ 는 해양의 여러 가지 현상과 많은 관계가 있고, 이러한 필요성 때문에 미 항공우주국 (National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서는 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) 해석 센서에 맞는 $K_d(\lambda)$ 알고리즘을 개발하여 사용하고 있다. 그 외에 $K_d(\lambda)$ 자체에 대한 연구로는 Museler (2003)가 멕시코 만 (Gulf of Mexico)에서의 $K_d(\lambda)$ 계수와 수중에서의 수직적, 수평적 시계, 그리고 흡광 및 소산 계수에 대한 연구를 수행하였으며, Rasmus *et al.* (2004)는 남극 해에서의 광학적 특성을 연구하였고, Mishra *et al.* (2005)는 연안 지역인 혼두라스의 Roatan 섬 주변에서의 $K_d(\lambda)$ 특성을 연구한 바 있다. 수중시계에 대한 연구는 가장 일반적이고 오래된 방법은 Secchi disk를 이용하는 것이다. 지금도 여전히 수중시계를 구하기 위하여 이용되고 있는 방법이지만 방대하게 넓은 해양에 대해서 적용하기에는 한계가 있다. 이러한 문제점 때문에 위성자료를 이용하여 수중시계를 구하는 연구가 시도되고 있고, 미국 NRL (Naval Research Laboratory)에서는 대표적인 해석 위성자료인 SeaWiFS 센서 자료를 이용하여 수중시계를 구하는 알고리즘을 개발하였다 (Museler, 2003). 우리나라에서는 서영상 등 (1993)이 서해에서 관측된 secci disk 자료와 NOAA 위성자료와의 상관관계를 분석한 연구를 수행하였다. 이외에도 많은 연구가 전 세계의 다양한 해역을 대상으로 진행 중에 있으나 이에 비해 우리나라 주변 해역에 대한 연구는 매

우 미흡한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 주변 해역을 대상으로 $K_d(\lambda)$ 계수와 수중에서의 수직적, 수평적 시계, 그리고 흡광 및 소산 계수에 대한 연구를 수행하였고, 얻어진 자료를 이용하여 우리나라 주변 해역 특성에 맞는 K_d 및 수중시계 알고리즘을 개발하였다. 또한 대표적인 알고리즘인 NASA의 SeaWiFS K_d 알고리즘 및 NRL의 수중시계 알고리즘과 각각 비교하여 보았다.

2. 연구지역 및 자료

1) 연구지역

연구 지역은 남한의 서해 연안 중부에 해당하는 새만금 지역이다. 서해는 중국대륙, 동해 연안과 우리나라 서해 연안으로 둘러싸여 있는 반폐쇄적인 해역으로, 육지로부터 다량의 부유퇴적물을 공급하는 강과 하천이 많이 인접해 있는 해역이다. 또한 강한 조류가 발생하여 저층의 부유퇴적물들이 표층으로 재부유하는 매우 탁한 해역이다. 따라서 부유퇴적물의 공급원이 많고 다양하기 때문에, 시·공간적으로 부유물 농도 분포가 다양하게 나타난다(최유규와 권정노, 1998).

새만금 지역은 만경강과 동진강을 통해 많은 양의 담수와 함께 육상 기원 쇄설물을 포함한 토사들이 새만금 유역으로 다량 유입되고, 북쪽에 위치한 금강을 통해서도 많은 양의 퇴적물들이 유입되고, 남쪽에서는 강한 조류를 통해 탁도 높은 해수가 유입되는 지역이었다(이상호 등, 2003). 하지만 이 지역은 총 길이 33 km에 달하는 대규모의 방조제의 건설을 1991년 11월 28일에 시작하여, 2003년 말에 4호 방조제가 완공되었고, 2006년 4월에는 모든 방조제 공사를 마쳐서 16년에 이르는 대규모 공사가 완료됨(새만금 해양환경연구센터 홈페이지)에 따라 공사에 의한 부유퇴적물 농도 및 분포를 포함한 해양 환경이 방조제 안과 밖을 중심으로 다양하게 변화되어 왔다.

해양광학적인 측면에서 해수는 “Case-I water”와 “Case-II water” 두 가지로 구분되는데 (Morel and Prieur (1977)) Case-I water는 해수의 광특성이 해수 수괴 또는 식물플랑크톤 (phytoplankton)과 그들의 부산물들 (유기성 쇄설물, 동물플랑크톤 (zooplankton)의

섭식에 의한 부산물, 조류세포들의 자연부패 등)에 의해서 결정되는 해수로, 맑은 해수이며 대양 (open ocean)과 같은 해수가 대표적이다. Case-II water는 해수의 광 특성이 부유무기입자, 비색소 생물입자, 용존유기물 등에 의해서 결정되는 해수로서 탁한 해수이고 높은 생산력을 가지고 있으며 연안 해역의 해수 (coastal water)가 대표적이다. 본 연구 해역은 방조제 건설 전과 건설 중에는 탁도가 높은 Case-II water 특성을 나타냈으나, 방조제가 완공됨으로써 만경강 동진강으로부터의 부유퇴적물 공급이 차단되어 맑은 해수 특성을 나타내고, 만경강과 동진강으로부터의 유입이 줄어든 반면 북쪽의 금강과 남쪽의 조류를 통한 탁수 유입이 약간 늘어가게 되어 바람, 조류, 강수량 등의 환경조건에 따라 Case-I water와 Case-II water가 공존하는 해역 특성을 나타나게 되었다. 따라서 다양한 해수 특성을 갖는 본 해역을 연구지역으로 선정하였다.

2) 현장관측자료

이 해역에서 해양 광학적 자료와 해양 환경적 자료를 얻기 위하여 2006년 9월 19 ~ 22일, 4일 동안 총 39개 정점에서 현장관측을 실시하였다(Fig. 1). 수중에서의 광학 자료 획득을 위해서 TriOS Optical Sensors 사의 UV/VIS spectrometer (이하 TriOS) 장비와 Web Labs, 사의 Spectral Absorption and Attenuation Meter (AC-S)를 사용하였고, 표층에서의 광학 자료를 획득하기 위하여 ASD (Analytical Spectral Devices) 사의 FieldSpec Dual RS³ Spectroradiometer라는 광학장비를 사용하였다(이하 ASD라 함). 수중시계를 파악

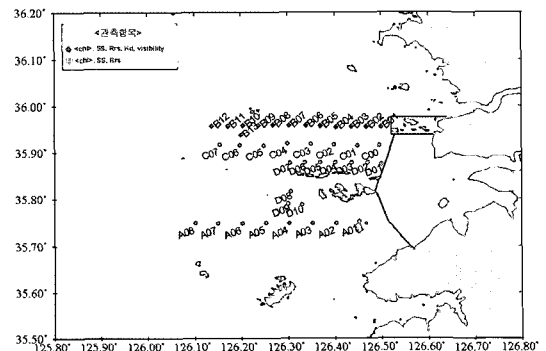


Fig. 1. Map of the Saemangeum coastal area showing sampling points/stations during 19-22 September, 2006.

Table 1. Summary of measurements.

	Measurements
A, C, D line	sampling (<chl>, SS) optic (ASD)
B line	sampling (<chl>, SS) optic (ASD, TriOS, visibility)

* <chl>: Chlorophyll concentration
 SS: Suspended sediment concentration
 ASD: Field spectroradiometer measurement for surface
 TriOS: UV/VIS spectrometer measurement for water profile
 visibility: vertical and horizontal visibility using secchi disk obtained by diver

하기 위하여 각 정점 별로 Secchi disk를 이용하여 다이버가 수중에서의 수직 및 수평 시계를 측정하였다. 또한 해수 환경 특성을 알아보기 위해서 각 정점에서 엽록소와 부유물질의 농도를 분석하였다. 각 정점 라인별 관측항목을 Table 1에 정리하였다.

TriOS 광학 장비는 Hyperspectral UV-VIS Irradiance Sensor 1 개와 Hyperspectral UV-VIS Radiance Sensor 2 개를 사용하였다. 이 관측 장비는 케이블로 내리면서 수심별로 320 ~ 950 nm 파장영역에서의 수직적인 광 에너지를 측정할 수 있는 프로파일링(Profiling Reflectance Radiometer, PRP) 장비이다. 아래에서 올라오는 광량을 측정하기 위해서 아래 방향으로 radiance sensor (upwelling radiance용 sensor: L_u)와 irradiance sensor (upwelling irradiance용 sensor: E_u)를 설치하고 또, 반대로 위에서 아래로 내려가는 광량을 측정하기 위해서 irradiance sensor (downwelling irradiance용 sensor: E_d)를 하나 설치하여 관측하였다. TriOS 장비를 이용하여 수중에서의 수심별 하향 및 상향으로의 irradiance (E_d 와 E_u)와 상향으로의 radiance (L_u)를 측정하였다. AC-S 역시 수심별로 내리면서 소산계수 (attenuation coefficient, c)와 흡광 계수 (absorption coefficient, a)를 관측하는 PRP 장비이다. 이 관측 장비는 400 ~ 750 nm 파장영역에서 약 4.4 nm 간격으로 a 와 c 계수 값을 관측할 수 있다. a 와 c 계수 값은 주위의 광학적 환경에 무관하게 일정한 값을 갖는 고유광특성(Inherent Optical Properties, IOP) 계수이다. 또한 위성에서 얻어지는 해수 반사도 값을 현장에서 측정하기 위하여 ASD를 이용하여 350 ~ 1050 nm 범위에서 1 nm 간격으로 해수 표면에서의 총수출광량(total water leaving radiance, L_{wt}), 태양에서의 총 반구상으로 내려오는 총광량

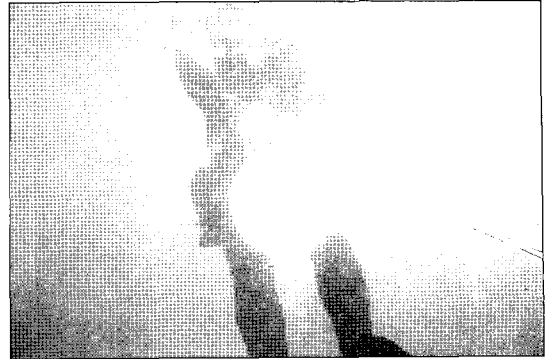


Fig. 2. Diver view of a secchi disk for horizontal visibility at a depth of 1m.

(down-welling irradiance, E_d)을 관측하였고, 총 수출 광량 값에서 대기에 의한 영향을 제거하기 위하여 대기에 의한 광량 (sky radiance, L_{sky})을 관측하였다. 수중 시계 관측을 위해서 30 cm 지름의 흰색 원판(secchi disk)을 사용하였다. 2명의 다이버가 줄자를 이용하여 표층에서 1 m 깊이에서의 수평 수중시계를 관측하였고 (Fig. 2), 수직 수중시계는 흰색 원판에 길이 표시가 된 줄을 달아 내리면서 표층 바로 아래에서 다이버가 눈으로 보면서 secchi disk가 보이지 않을 때의 길이를 측정하였다. 모든 광학관측은 태양광이 충분히 있을 때에 실시해야 하기 때문에 오전 10시 ~ 오후 3시 사이에 관측을 실시하였다.

엽록소 농도 관측을 위해서 각 정점별로 표층 해수를 채수하여 47 mm GF/F로 해수를 여과하였고, 부유물질의 농도 관측을 위해서는 미리 무게를 잰 25 mm GF/F를 이용하였다. 여과정도는 필터에 엽록소가 충분히 착색되도록 1,000 ~ 2,000 ml 정도 여과하였고 부유물질의 경우 500 ml 정도 여과하였다. 부유물질의 농도는 여과된 필터를 60°C에서 4시간 건조시킨 다음 무게를 측정하여 여과 전과 후의 필터 무게차를 이용하여 계산하였다. 엽록소의 경우는 필터에서 엽록소를 추출하기 위하여 90 % 아세톤 10 ml를 넣은 후 24시간 동안 4°C 냉장 상태로 보관하였다. 25 mm membrane PTFE type syringe 필터를 사용하여 필터 불순물들을 제거한 다음 석영으로 된 1 cm 광학셀 (optical cell)에 넣어 UV/VIS dual beam spectrophotometer (Perkin-Elmer 사의 Lambda19 모델)를 이용하여 파장에 따른 엽록소의 Optical Depth (OD)를 측정한다 다음 Jeffrey and Jumphyre (1975)의 식 (수식 (1))에 의

해 엽록소 농도를 산출하였다.

$$\langle \text{chl} \rangle (\text{mg}/\text{m}^3) = \frac{C \times V}{V} \quad (1)$$

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

이 식에서 E_{630} , E_{647} , E_{664} 는 spectrophotometer에서 측정된 파장(630, 647, 664 nm)에서의 엽록소의 값이고, V 는 90% 아세톤의 사용량(ml)으로 본 연구에서는 10 ml를 사용하였다.

3. 이론적 배경 및 연구방법

해수 수중에서의 빛 에너지의 소멸은 아래의 수식 (2)와 같이 지수함수적으로 표현할 수 있다.

$$E_d(z) = E_d(0) e^{-\int_0^z K_d(z) dz} \quad (2)$$

여기서, z 는 수심, 0 는 해수 표면 바로 아래의 수심을 의미한다. 위의 수식 (2)로부터 $K_d(\lambda)$ 는 두 수심 사이의 E_d 값의 상대적인 감소량을 나타내는 아래의 수식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$K_d = -\frac{1}{(z_2 - z_1)} \ln \left[\frac{E_d(z_2)}{E_d(z_1)} \right] \quad (3)$$

본 연구에서는 위의 수식 (3)을 이용하여 관측된 E_d 값으로부터 $K_d(\lambda)$ 를 유추하였다.

이렇게 구해진 $K_d(\lambda)$ 와 ASD로 측정된 L_w 값을 이용하여 $K_d(\lambda)$ 알고리즘을 개발하였다. 인공위성 자료를 이용하여 $K_d(\lambda)$ 를 추정할 수 있는 방법은 현재 다음과 같은 3가지 방법이 있다(Lee *et al.* (2005)). 첫 번째 방법은 1단계의 경험적 상관관계 방법(Direct one-step empirical relationship method)이고 두 번째 방법은 2단계의 경험적 상관관계 방법(Two-step empirical relationship method) 마지막 방법은 반분석적 접근 방법(Semi-analytical approach method)이다.

첫 번째 방법은 L_w 또는 R_{rs} 값으로부터 $K_d(\lambda)$ 값을 바로 유추해 내는 것으로서 L_w 또는 R_{rs} 와 $K_d(\lambda)$ 값 간의 상관관계를 경험적으로 분석하여 알고리즘을 구하는 방법이다. $K_d(490)$ 는 $K_d(\lambda)$ 를 추정하기 위한 핵심이 되는 값이다 (Austin and Petzold (1981 and 1986)). 따라서 $K_d(\lambda)$ 를 구하기 위해 우선 $K_d(490)$ 의 값을 구해야 한다. $K_d(490)$ 는 아래와 같은 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$K_d(490) = K_w(490) + A \left(\frac{L_w(\lambda_1)}{L_w(\lambda_2)} \right)^B \quad (4)$$

여기서 Austin and Petzold (1981)의 연구에 따라, $\lambda_1 = 443$ nm, $\lambda_2 = 550$ nm이고, $K_w(490)$ 은 490 nm에서의 순수한 해수의 소산 계수를 나타내고 A와 B는 상수이다(Morel, 1988; Smith and Baker, 1981). 이 방법을 이용하여 Mueller and Trees (1997)와 Mueller (2000)는 SeaWiFS 위성영상으로 $K_d(490)$ 값을 추정하는 알고리즘을 다음과 같이 개발하였다.

$$K_d(490) = K_w(490) + 0.15645 \left(\frac{L_w(490)}{L_w(550)} \right)^{-1.5401} \quad (5)$$

여기서 $K_w(490)$ 은 0.016 m^{-1} 이다(Mueller, 2000).

원격반사도(R_{rs})는 E_d 와 L_w 의 비로 나타낼 수 있으므로 위의 식은 아래와 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$K_d(490) = 0.016 + 0.15645 \left(\frac{E_d(490) R_{rs}(490)}{E_d(550) R_{rs}(550)} \right)^{-1.5401} \quad (6)$$

SeaWiFS Data Analysis System (SeaDAS)에서 사용되고 있는 $K_d(490)$ 알고리즘은 $E_d(490)/E_d(550)$ 값이 태양각에 상관없이 1.03 정도로 일정하다는 가정 하에 다음의 수식 (7)을 사용하고 있다.

$$K_d(490) = 0.016 + 0.15645 \left(1.03 \cdot \frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(550)} \right)^{-1.5401} \quad (7)$$

두 번째 방법은 R_{rs} 값으로부터 클로로필 농도 값을 계산한 다음, 구해진 클로로필 농도 값과 $K_d(\lambda)$ 값 사이의 상관관계를 경험적으로 분석하여 알고리즘을 구하는 방법이다. 아래의 수식 (8)은 엽록소 농도와 $K_d(\lambda)$ 값 사이의 상관관계를 나타내는 식이다. Morel and Maritorena (2001)는 490 nm의 파장에서의 κ 는 0.07242, e 는 0.68955의 값을 갖는다는 결과를 얻었다.

$$K_d(\lambda) = K_w(\lambda) + \kappa(\lambda) \text{Chl}^{e(\lambda)} \quad (8)$$

마지막 방법은 분석적인 모델을 이용하는 방법으로 Lee *et al.* (2005)이 제안하였는데 R_{rs} 을 입력 값으로 하여 원격반사도 Quasi-Analytical Algorithm (QAA) 모델(Lee *et al.* (2002))로부터 a , b_b 값을 얻어낸 다음, 또 다른 $K_d(\lambda)$ 추정 모델(Lee *et al.* (2005))을 이용하여 $K_d(\lambda)$ 값을 유추해 내는 방법이다. $K_d(\lambda)$ 는 외형적 광특성(Apparent Optical Properties, AOP)로서 해양의 환경적 요소에 따라서 변하는 변수 값이다. 외형적 광특

성(AOP)은 해수의 고유 광특성(IOP)과 radiative transfer 이론을 기반으로 하는 경계조건들 (태양천정각, 해양 상태 등)에 의해서 결정된다. 이러한 개념을 바탕으로 해수의 고유 광특성의 요소인 a , b_b (backscattering, 역산란) 자료와 경계조건인 태양천정각 자료를 이용하여 $K_d(\lambda)$ 값을 계산해 내는 것이 반분석적 접근 방법이다. 해석위성영상 자료를 이용하여 이 방법으로 $K_d(\lambda)$ 값을 계산할 때, 우선 대기보정된 R_{rs} 영상으로부터 a , b_b 값을 계산해 낸다.

$$K_d = m_0 a + m_1(1 - m_2 e^{-m_3 a}) \cdot b_b \quad (9)$$

여기서, $m_0 \approx 1 + 0.005\theta_a$ 이고, θ_a 는 태양천정각이다. m_1 , m_2 , m_3 는 이 모델의 상수 값이고, 파장이나 해수 상태에 상관없이 일정한 값이다.

위의 첫 번째와 두 번째 방법인 경험적 접근방법은 자료를 얻어내는 과정에서 큰 에러를 포함할 수 있는데, 특히 자료의 획득과 적용이 일치하지 않는다면 그 에러 값은 매우 커질 수 있다. 따라서 이러한 경험적 알고리즘들은 세계적 범위의 적용이 힘들다는 단점을 가지고 있다. 이와는 반대로 radiative transfer 이론을 기반으로 하는 반분석적인 접근 방법은 에러의 확률을 많이 줄일 수 있다는 장점이 있다. 하지만 반대로 세 번째 방법은 R_{rs} 에 대한 스펙트럼의 모양뿐만 아니라 절대적인 값도 이용하는 것이기 때문에 R_{rs} 에 대한 정확한 측정이 매우 중요하다. 또한 2단계에 걸쳐 다른 모델을 사용하여 값을 추정하기 때문에 모델의 정확도에 따른 검정이 완벽하게 되지 않는다면 신뢰할 수 있는 결과 값을 얻기 힘들다는 결정적인 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 모델을 이용한 방법이 아닌 경험적 상관관계를 구하는 2가지 방법 중에서 L_w 값으로부터 직접적으로 $K_d(\lambda)$ 를 추정할 수 있는 첫 번째 방법을 사용하여 알고리즘을 개발하였다. 본 연구는 연안의 한정된 해역에서의 관측 값을 토대로 알고리즘을 개발하는 것이기 때문에 경험적 방법의 적용에 큰 문제가 없을 것으로 생각된다.

수중에서의 시계 알고리즘은 다음의 두 수식에 의해서 유도될 수 있다. 수식 (10)은 Preisendorfer (1976)에 의해 개발된 간단한 radiative transfer model을 나타내고, 수식 (11)은 수중에서의 brightness contrast를 나타내는 수식이다.

$$\frac{dL}{dr} = -(a + b)L + L^* \quad (10)$$

$$C_o = \frac{L_T - L_B}{L_B} \quad (11)$$

여기서, L 은 apparent radiance, r 은 path distance, a 는 흡광계수(absorption coefficient), b 는 산란계수(scattering coefficient), L^* 은 path function을 나타내고, C_o 는 brightness contrast이고 L_T 는 target radiance, L_B 는 background field radiance를 나타낸다.

이 두 수식으로부터 다음의 수식 (12)을 유도해 낼 수 있다.

$$C_r = C_o e^{-(c + K \cos \theta) r} \quad (12)$$

이 식에서 C_r 은 apparent contrast이고, r 은 visibility length를 나타낸다. 이 수식을 r 에 의한 식으로 변경하면 아래의 수식 (13)과 같은 시계 (visibility length)에 대한 산출식을 얻을 수 있다.

$$r = \frac{-\ln(\frac{C_r}{C_o})}{c + K \cos \theta} \quad (13)$$

이 방법을 이용하여 NRL에서는 blackbody target을 이용하여 수중에서의 수직과 수평의 대비도 (contrast)를 측정하여 수직 (수식 (14)) 및 수평 (수식 (15)) 시계 알고리즘을 다음과 같이 개발하였다.

$$r_{vertical} = \frac{4.0}{c + K} \quad (14)$$

$$r_{horizontal} = \frac{4.8}{c} \quad (15)$$

본 연구에서는 이 연구결과를 바탕으로 광학기기를 이용하여 관측된 소산계수 (c)와 $K_d(\lambda)$ 값, 그리고 secchi disk를 이용하여 얻어진 수직 및 수평 시계 자료로부터 경험적 방법으로 상수 값을 얻는 방식으로 수중시계 알고리즘을 개발하였다.

4. 결 과

1) $K_d(\lambda)$ 알고리즘 개발

현장 관측을 통해서 얻어진 $K_d(\lambda)$ 값은 Fig. 3과 같다.

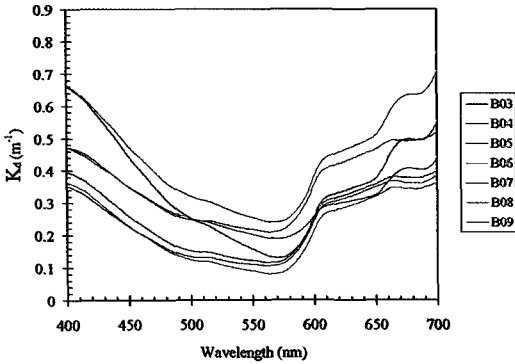


Fig. 3. Spectral diffuse attenuation coefficient (K_d) for each stations.

각 정점별로 수심 0 m와 20 m의 E_d 관측 값을 수식 (2)에 적용하여 $K_d(\lambda)$ 값을 유추하였다. 각 정점별로 비슷한 형태의 스펙트럼 값을 나타내는 것을 알 수 있었다. 전체적인 형태는 575 nm를 중심으로 파장이 짧아질수록 값이 증가하였고, 또한 파장이 길어질수록 증가하는 패턴을 나타내었다. 575 nm 이후 파장대에서의 증가 패턴은 순수한 해수의 $K_d(\lambda)$ 스펙트럼의 일반적인 성격으로 설명될 수 있다(Smith and Baker, 1981). 575 nm 이전의 파장대 부분의 파장이 짧아질수록 증가하는 패턴은 우리나라 서해 연안의 클로로필과 부유물질 및 용존유기물질 등의 높은 농도로 인한 흡광 특성이라고 볼 수 있다.

이렇게 얻어진 $K_d(\lambda)$ 값을 SeaWiFS의 $K_d(490)$ 자료와 비교하여 보았다. Fig. 4는 2006년 9월 21일에 획득된 SeaWiFS로부터 얻어진 $K_d(490)$ 영상이다. 이 자료에서 각각의 정점에 해당하는 값을 추출하여 현장관측 값과 비교하여 보았다. Fig. 5는 현장관측 $K_d(490)$ 값과

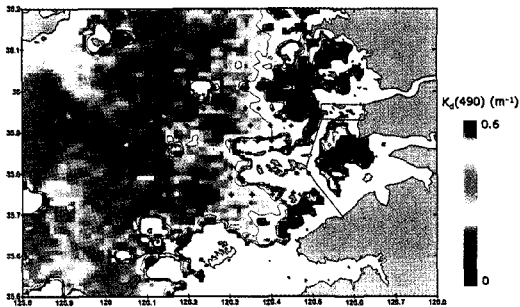


Fig. 4. SeaWiFS $K_d(490)$ Product obtained at 21 September 2006.

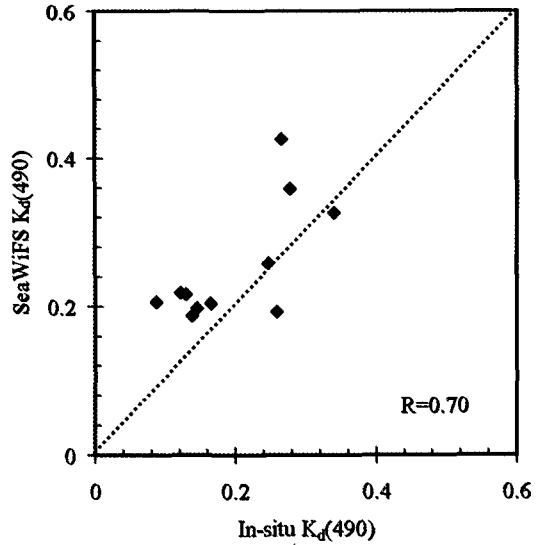


Fig. 5. Comparison between in-situ $K_d(490)$ and SeaWiFS $K_d(490)$.

SeaWiFS $K_d(490)$ 값을 비교한 그래프이다. 현장 관측 값에 비해 SeaWiFS $K_d(490)$ 이 조금 높은 값을 보였지만 전체적으로 상관관계가 0.7로서 비교적 높은 상관관계를 보이는 것을 알 수 있었다.

현장에서 얻어진 $K_d(\lambda)$ 와 L_{wn} 값을 이용하여 $K_d(\lambda)$ 알고리즘을 개발하였다. 아래의 수식 (16)은 본 연구를 통해 개발된 $K_d(490)$ 알고리즘을 나타낸다. 이 결과를 NASA의 SeaWiFS $K_d(490)$ 알고리즘과 비교하여 보았다(Fig. 6).

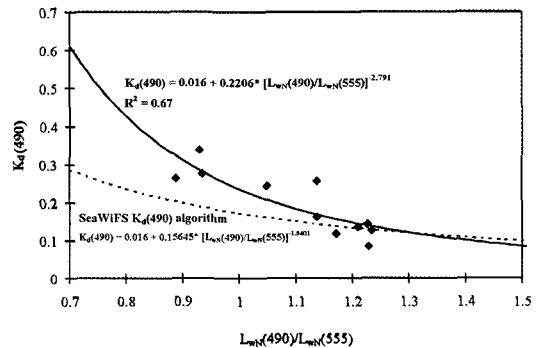


Fig. 6. Comparison of $K_d(490)$ versus the ratio of normalized water-leaving radiances (L_{wn}) at 490 and 555 nm (solid line represent $K_d(490)$ algorithm for this study and dot line represent the SeaWiFS $K_d(490)$ algorithm developed by NASA).

$$K_d(490) = 0.016 + 0.2206 \left(\frac{L_{wN}(490)}{L_{wN}(555)} \right)^{2.791} \quad (R^2 = 0.67) \quad (16)$$

그 결과, 우리나라 서해 연안 관측 자료를 이용하여 얻은 알고리즘이 $L_{wN}(490)/L_{wN}(555)$ 의 값이 작아질수록 SeaWiFS 알고리즘에 비해서 높은 $K_d(490)$ 값을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. $L_{wN}(490)/L_{wN}(555)$ 값이 1보다 작다는 것은 $L_{wN}(490)$ 값이 $L_{wN}(555)$ 보다 작은 값을 보이는 탁한 해수의 특징을 나타낸다. 즉 $L_{wN}(490)/L_{wN}(555)$ 값이 1 이하로 작아질수록 해수는 더욱 탁한 성격을 나타낸다고 볼 수 있다. NASA 알고리즘과 비교해 보았을 때, 이러한 탁한 해수일 경우에 본 연구에서 얻어진 알고리즘이 NASA의 알고리즘에 비해 높은 $K_d(490)$ 값을 추정하는 것을 알 수 있었다. 이는 NASA 알고리즘 구축에 사용된 자료들이 대부분 맑은 해수 특성을 보이는 태양에서 얻어졌기 때문에 탁한 해수 특성을 잘 반영하지 못하고 있음을 보여준다. 반면에 본 연구에서 사용된 자료는 탁한 해역의 자료이기 때문에 탁한 해역 특성을 잘 반영하고 있다. 따라서 Case-II water 해역의 특성을 띄는 우리나라 서해 연안의 경우에는 기존의 SeaWiFS $K_d(490)$ 알고리즘이 맞지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 비록 10개 밖에 안 되는 샘플을 이용하여 만든 알고리즘이기 때문에 기존의 알고리즘과 정확한 비교는 불가능 할 수 있겠지만 본 연구는 이렇게 기존의 알고리즘의 적용이 불가능한 우리나라 연안 해역에 대한 $K_d(490)$ 알고리즘을 개발하였다는 것에 의미가 있을 것이다. 현장 관측 자료가 매우 적다는 문제점은 앞으로 지속적인 현장 관측과 업데이트를 통하여 해결해 나갈 예정이다.

2) 수중시계 알고리즘 개발

본 연구에서는 NRL의 연구 결과를 토대로 우리나라 해역에 맞는 수중시계 알고리즘을 개발하였다. Fig. 7은 B line 정점에서 얻어진 수중에서의 수평 및 수직 가시 거리에 대한 결과이다. B01 정점에서 B13 정점으로 갈수록 연안에서 외해쪽으로 멀어지는 것으로서, 외해로 나갈수록 맑은 해수 환경을 나타내기 때문에 가시거리는 길어지는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 B07 정점을 기준으로 그 이상 나가더라도 가시거리의 약간의 줄어드는 경향을 볼 수 있는데, 이는 태양광이 가장 높은 정

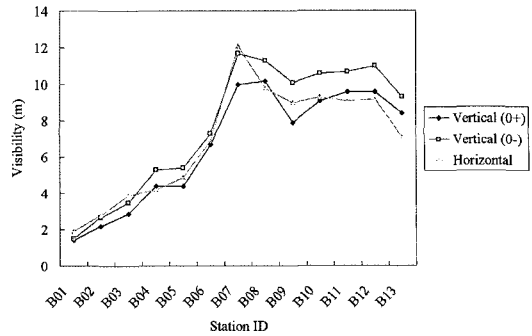


Fig. 7. In-water horizontal visibility (1 m depth from surface) and in-water (Vertical (0-)) & out-water (Vertical (0+)) vertical visibility at surface along the transect (B line).

오를 지나면서 태양 에너지가 줄어들어서 입력에너지의 감소로 인한 결과 값의 감소로 볼 수 있다. 이렇게 현장관측을 통해 얻은 수중시계 자료와 $K_d(\lambda)$ 값과 소산 계수 (c) 값을 이용하여 다음과 같이 수중 시계 알고리즘을 개발하였다. 수식 (17)은 수중에서의 수직적 시계 산출 알고리즘이고 수식 (18)은 수중에서의 수평적 시계 산출 알고리즘이다. 이 결과는 NRL의 결과(수식 (14)와 (15))와 비교해 보았을 때, 약간 높은 상수 값을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 해수 중의 구성 성분 물질의 조합 및 그 외의 환경조건에 의한 차이, 그리고 관측 장비 및 관측 방법에 의한 차이 등으로 생각된다.

$$r_{vertical} = \frac{6.9}{c + K_d} \quad (17)$$

$$r_{horizontal} = \frac{5.8}{c} \quad (18)$$

NRL에서 사용한 방법 이외에 부수적으로 $K_d(\lambda)$ 와 수직적 및 수평적 시계(vertical & horizontal visibility) 값을 경험적 방법으로 비교하여 본 결과 490 nm 밴드 영역에서 가장 좋은 결과 값을 보였으며, 아래의 수식 (19) & (20), Fig. 8과 같은 결과를 얻었다.

$$r_{vertical} = -29.46 \cdot K_d(490) + 14.534 (R^2 = 0.71) \quad (19)$$

$$r_{horizontal} = -27.50 \cdot K_d(490) + 13.175 (R^2 = 0.75) \quad (20)$$

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 해양에서의 광학적 성격을 나타내는 중요한 지수인 하향 확산 감쇠계수 및 수중시계에 대한

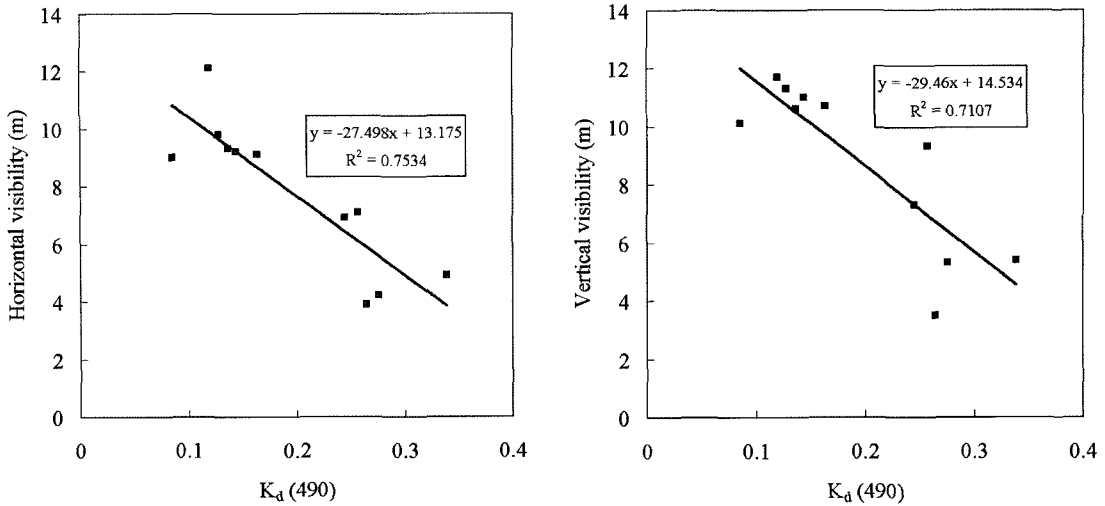


Fig. 8. Relationship graph for horizontal & vertical visibility with $K_d(490)$.

연구를 우리나라의 황해 중부 연안 해역을 대상으로 수행하였다. 이를 위해 2006년 9월 19일 ~ 22일, 4일 동안 현장관측을 실시하여 해양 광학적 자료와 해양 환경적 자료를 얻었다. 얻어진 자료를 이용하여 우리나라 해역 특성에 맞는 $K_d(\lambda)$ 와 수중시계 알고리즘을 개발하였고, 각각의 알고리즘은 기존의 NASA SeaWiFS $K_d(\lambda)$ 알고리즘 및 NRL의 SeaWiFS 수중시계 알고리즘과 비교하여 보았다.

그 결과 $K_d(\lambda)$ 알고리즘의 경우 탁도가 높은 부분에서는 NASA의 $K_d(\lambda)$ 알고리즘보다 높은 값을 추정하는 것을 알 수 있었다. 이는 NASA의 알고리즘 구축 당시 사용된 자료가 거의 맑은 해역 특성을 보이는 대양에서 관측된 자료를 사용했기 때문에 탁한 해수 특성을 반영하지 못하기 때문으로 생각된다. 반면에 본 연구에서 얻어진 자료는 연안의 Case-II water 특성이 강한 해역에서 얻어진 자료들로서 탁한 해수의 특성에 대한 $K_d(\lambda)$ 값들을 나타내고 있다. 따라서 NASA의 $K_d(\lambda)$ 알고리즘과는 다른 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 본 연구에서 알고리즘 개발에 사용된 자료는 한정된 해역의 적은 관측 자료를 사용한 것이기 때문에 NASA의 알고리즘과 직접적인 비교를 하는 것은 무리가 있다고 생각된다. 추후에 맑은 Case-I water 특성을 나타내는 우리나라의 동해나 남해에서의 관측 자료를 추가한다면 우리나라 해역 특성을 대표할 수 있는 알

고리즘이 개발될 수 있을 것으로 생각한다.

수중시계 알고리즘의 경우에는 NRL의 알고리즘보다 약간 높은 상수 값을 얻을 수 있었다. 이는 해수 중의 구성 성분 물질의 조합 및 그 외의 환경조건에 의한 차이, 그리고 관측 장비 및 관측 방법에 의한 차이 등으로 생각된다. 보다 정확한 비교를 위해서는 이러한 조건들의 비교가 필요하지만, Museler (2003)의 논문에서 이러한 자료들에 대한 언급이 없었기 때문에 비교에 필요한 자료를 얻을 수 없었다. 우리나라는 Case-I water 특성을 지나는 동해와 남해, 그리고 Case-II water 특성을 지나는 서해와 동중국해로 구성되는 다양한 해역을 가지고 있다. 따라서 앞으로 우리나라의 다양한 해역을 대상으로 수중시계 및 해양 환경적 특성을 조사하여 각 요소에 의한 상관관계를 분석하고 비교함으로써 어떠한 차이가 생기는가를 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 우리나라에서는 거의 미미한 연구 분야인 수중에서의 해양광학적 특성들에 대해서 연구하였다는 것에 의미가 있겠다. 또한 획득한 자료를 이용하여 인공 위성 영상 자료 분석을 통해 정보를 얻을 수 있도록 알고리즘을 구축하여 기존의 해색 위성 및 추후 우리나라의 해색 위성 자료분석에 이용될 수 있도록 하였다. 비록 이번 연구에서는 한 번의 현장 관측을 통해 좁고 한정된 지역의 자료를 이용하였다는 단점은 있지만 앞으로 본 연구결과를 토대로 우리나라의 여러 해역에 대해

서 지속적인 현장관측을 실시하여 광학 자료를 모으고, 알고리즘을 꾸준히 업데이트 하여 우리나라 전체 해역을 대표할 수 있는 알고리즘을 구축할 계획이다.

또한 우리나라는 세계 최초의 정지궤도 해상 센서인 Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)를 2008년 말에 통신해양기상위성(Communication Ocean and Meteorological Satellite, COMS)에 탑재하여 쓰아 올릴 예정이다. 본 연구에서 개발된 알고리즘들은 앞으로 운영될 GOCI 센서에 적용되어 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 통신해양기상위성 활용사업 사업 (PM43600)과 공공기술연구회의 위성자료공공활용연구-해양분야 위성활용연구 사업 (PG45300)의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

서영상, 한상복, 강용균, 1993. NOAA 원격자료에 의한 황해 남동부 투명도의 추정, 대한원격탐사학회지, 9(2): 1-5.

이상호, 최현용, 손영태, 권효근, 김영곤, 양재삼, 정해진, 김종구, 2003. 하계 서해안 새만금 연안역 주변 저염수의 순환, 한국해양학회지, 8(2): 138-150.

최용규와 권정노, 1998. 황해 남동해역 투명도의 계절 변화, 한국수산학회지, 31(3): 323-329.

Austin, R. W. and T. J. Petzold, 1981. The determination of the diffuse attenuation coefficient of sea water using the coastal zone color scanner, *Oceanography From Space*, Springer, New York.

Austin, R. W. and T. J. Petzold, 1986. Spectral dependence of the diffuse attenuation coefficient of light in ocean waters, *Optical Engineering*, 25: 473-479.

Chang, G. C. and T. D. Dickey, 2004. Coastal ocean optical influences on solar transmission and radiant heating rate, *Journal of Geophysical Research*, 109: C01020, doi:10.1029/2003JC001821.

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

Kirk, J. T. O., 1986. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, Cambridge Univ. Press, New York.

Lee, Z. P., K. L. Carder, and R. Arnone, 2002. Deriving inherent optical properties from water color: A multi-band quasi-analytical algorithm for optically deep waters, *Applied Optics*, 41: 5755-5772.

Lee, Z. P., M. Darecki, K. L. Carder, C. O. Davis, D. Stramski, and W. J. Rhea, 2005. Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: An evaluation of remote sensing methods, *Journal of Geophysical Research*, 110: C02017, doi:10.1029/2004JC002573.

Lewis, M. R., M. Carr, G. Feldman, W. Esaias, and C. McClain, 1990. Influence of penetrating solar radiation on the heat budget of the equatorial pacific ocean, *Nature*, 347: 543 - 545.

Marra, J., C. Langdon, and C. A. Knudson, 1995. Primary production, water column changes, and the demise of a Phaeocystis bloom at the Marine Light-Mixed Layers site (59_N, 21_W) in the northeast Atlantic Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 100: 6,633-6,644.

McClain, C. R., K. Arrigo, K-S. Tai, and D. Turk, 1996. Observations and simulations of physical and biological processes at ocean weather station P, 1951-1980, *Journal of Geophysical Research*, 101: 3,697-3,713.

- Mishra, D. R., S. Narumalani, and M. Lawson, 2005. Characterizing the vertical diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance in coastal waters: Implications for water penetration by high resolution satellite data, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60: 48-64.
- Morel, A. and Prieur, L., 1977. Analysis of variations in ocean colour, *Limnology and Oceanography*, 22: 709-722.
- Morel, A., 1988. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case 1 waters), *Journal of Geophysical Research*, 93: 10,749-10,768.
- Morel, A. and D. Antoine, 1994. Heating rate within the upper ocean in relation to its bio-optical state, *Journal of Physical Oceanography*, 24: 1,652-1,665.
- Morel, A. and S. Maritorena, 2001. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal, *Journal of Geophysical Research*, 106: 7,163-7,180.
- Mueller, J. L., 2000. SeaWiFS algorithm for the diffuse attenuation coefficient, $K(490)$, using water-leaving radiances at 490 and 555 nm, *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses*, part 3: 24-27.
- Mueller, J. L. and C. C. Trees, 1997. Revised SeaWiFS prelaunch algorithm for diffuse attenuation coefficient $K(490)$, *NASA Tech. Memo.*, TM-104566, 41: 18-21.
- Museler, E. A., 2003. A comparison of in-situ measurements and satellite remote sensing of underwater visibility, Master's thesis, *Naval Postgraduate School*, Monterey, CA, 93943-5000.
- Platt, T., S. Sathyendranath, C. M. Caverhill, and M. Lewis, 1988. Ocean primary production and available light: Further algorithms for remote sensing, *Deep Sea Research*, 35: 855-879.
- Preisendorfer, R. W., 1976. Hydrologic optics, *U.S. Department of Commerce*, 1: 218.
- Rasmus, K. E., W. Graneli, and S. -A. Wangberg, 2004. Optical studies in the Southern Ocean, *Deep-Sea Research Part II*, 51: 2,583-2,597.
- Sathyendranath, S., T. Platt, C. M. Caverhill, R. E. Warnock, and M. R. Lewis, 1989. Remote sensing of oceanic primary production: Computations using a spectral model, *Deep Sea Research*, 36: 431-453.
- Smith, R. C. and K. S. Baker, 1981. Optical properties of the clearest natural waters, *Applied Optics*, 20: 177-184.
- Zaneveld, J. R. V., J. C. Kitchen, and H. Pak, 1981. The influence of optical water type on the heating rate of a constant depth mixed layer, *Journal of Geophysical Research*, 86: 6,426-6,428.
- 한국해양연구원 새만금해양환경연구센터 홈페이지
<http://www.saemangeum.re.kr/>