KIOST-TR-2022-0194

역산란 측정기의 자가 검교정 방법 매뉴얼

Self Cal/Val Method Mannual for backscatter measuring instrument

KIOST
KOREA INSTITUTE OF
OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

2022. 09. 27.

한 국 해 양 과 학 기 술 원

KIOST
KOREA INSTITUTE OF
OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

요 약

<table>
<tr><td rowspan="2">제 목</td><td>국문</td><td colspan="3">역산란 측정기의 자가 검교정 방법 매뉴얼</td></tr>
<tr><td>영문</td><td colspan="3">Self Cal/Val Mannual for Marine backscatter meter</td></tr>
<tr><td>관련과제명</td><td colspan="4">천리안 2B호 산출물 정확도 향상 연구 (PM63170)</td></tr>
<tr><td>저 자 명</td><td colspan="4">한태현</td></tr>
<tr><td>작성일자</td><td colspan="2">2022년 09월 27일</td><td>공개</td><td>공개(O), 비공개( )</td></tr>
<tr><td>유형</td><td colspan="4">기술동향자료( ), 기술업무메뉴얼(O), 비특허지적재산권( ), 결함보고서( )</td></tr>
<tr><td>주제분야</td><td colspan="4">해양물리( ), 해양화학( ), 해양생물( ), 해양지질( ), 해양공학( )
해양정책( ), 융복합( ), 기타(O)</td></tr>
<tr><td>Keyword</td><td colspan="4">역산란 측정기, 검교정, 미에 이론, Spectroradiometer, 감쇠 계수, 역산란 계수</td></tr>
<tr><td>초록</td><td colspan="4">역산란 계수는 해수에 존재하는 입자의 농도와 크기, 모양 등을 해석하는 데에 매우 유용한 변수이다. 일반적으로 현장에서 역산란 계수를 측정하기 위해서는 수중으로 투하하여 관측되는 연산란 측정기가 사용된다. 이러한 역산란 측정기에는 ECOBB, ECO-NTU, ECO-VSF 등이 있다. 이중 해양위성센터에서는 ECOBB 센서가 있으며, 멀티 밴드 역산란 측정기로는 Hydroscat과 ECO-BB9이 있다. 이러한 광학적인 역산란 측정기는 주기적으로 교정을 통해 그 정확도를 유지하여야 하나 제조사가 미국에 있는 관계로(현 Seabird 사) 교정을 할 경우 이동 소요시간, 교정 시간 등을 고려하면 운용가능 시간이 현저히 줄어들게 된다. 뿐만 아니라 운송비용과 검교정 비용 또한 많이 소요된다. 따라서 직접 검교정을 수행할 수 있고 검교정 결과를 신뢰할 수 있다면 비용과 시간 측면에서 매우 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 본 매뉴얼은 직접 교정을 수행하여 역산란 측정기를 교정하는 방법을 소개한다. 실험 결과상 역산란 측정기에서 나오는 Digial Number 당 Scale factor는 2.00E-06으로 계산되었으며, 검증을 위한 실험결과에서도 비슷한 Scale facctor인 2.12E-06이 계산되었다. 두 Scale Factor의 차이는 1.2E-07로 매우 낮으며, Wet lab(현 Seabird사)에서 제공하는 검교정 결과서의 편차 범위인 1.4E-07 보다 낮아 매우 정확한 것으로 확인되었다.</td></tr>
</table>

KIOST KOREA INSTITUTE OF OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

목 차

1. 서론 ····· 1
2. 본문 ····· 1
3. 결과 및 토의 ····· 7
4. 결론 ····· 9
5. 참고문헌 ····· 10

KIOST
KOREA INSTITUTE OF
OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

1. 서론

해수에서의 역산란 계수는 해수의 특성을 설명하는데 매우 중요한 변수이다. 해수중에 존재하는 입자 종류는 물론 그 크기와 모양 등에 따라 다른 값을 나타내기 때문이다. 또한 해수에서 역산란 계수에 가장 큰 영향을 미치는 것은 클로로필 농도와 무기물질의 종류와 양 그리고 용존 유기물이므로 해수를 이해하는데에는 필수적이라고 할 수 있다. 일반적으로 역산란 계수는 해양관측현장에서 역산란 측정기를 통해 측정된다. 특정한 파장의 빛을 해수중에 비추로 특정각도로 되돌아오는 빛의 강도를 측정하여 그 값을 계산한다. 여기서 특정한 각도는 역산란 측정기마다 다른 각도를 가지며, 이는 Sullivan et al., 2013에 잘 나와 있다.

이러한 역산란 측정기는 다른 광학적인 측정기와 마찬가지로 1년 이내의 일정주기마다 교정을 통해 그 관측값의 정확도를 유지시키는 것이 매우 중요하다. 그러나 역산란 측정기의 제조사는 대부분 외국(미국)이며 이에 교정에 들어가는 비용이 매우 높고, 운송비 또한 소요된다. 뿐만 아니라 교정이 이루어지는 동안에는 해당 관측기를 사용하지 못하므로 장비의 운용 계획 등에 큰 차질을 빚게 된다.

필자는 미국 메인주 메인대학교의 DMC(Darling Marine Center)에서 교육을 받으며 직접 수행한 역산란 측정기의 검교정 실험 방법을 소개고자 한다. 이 방법은 실험실에서 준비물만 있으면 간단하게 수행할 수 있으며, 그 결과 또한 매우 정확하다.

2. 역산란 측정기 검교정 방법

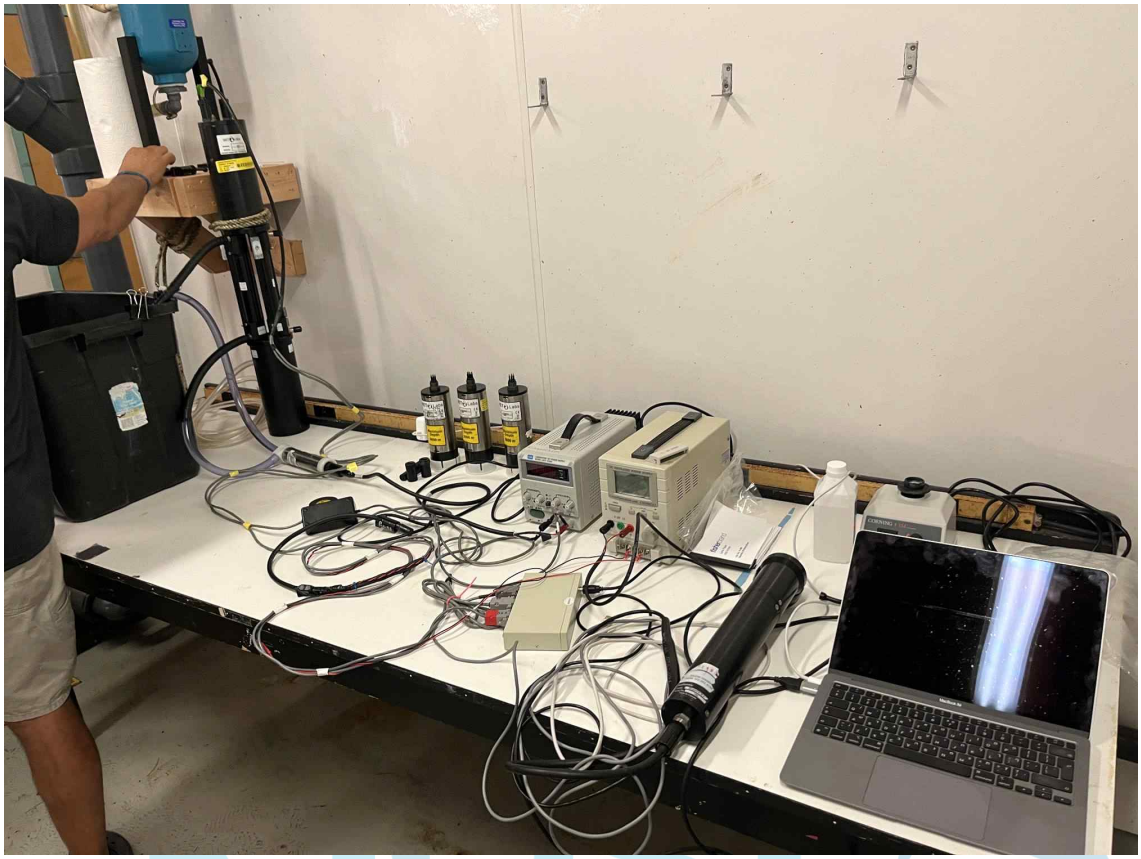
가. 준비물

- 검교정할 역산란 측정기, AC-S 또는 AC-9(Seabird)과 같은 흡광감쇠계수 측정기, TriOS RAMSES 또는 Hyper OCR과 같은 Spectroradiometer, 해수 순환 펌프(임펠러, 다이어프램), Tygon Tube, Vibrator, 검은 플라스틱 바스켓(증류수 순환용 20L 이상), 증류수 20L, Mie code (e.g. Bohren and Huffman, 1987)., 센서의 관측 파장과 관측 각도, NIST traceable beads (Duke Scientific) 2종류, 절연 테이프, isopropyl alcohol, 렌즈 페이퍼, 호스밴드

나. 실험방법

1. AC-S와 Tygon Tube, 순환 펌프, 검은색 플라스틱 바스켓을 이용하여 증류수의 순환계를 구성한다.

KIOST
KOREA INSTITUTE OF OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

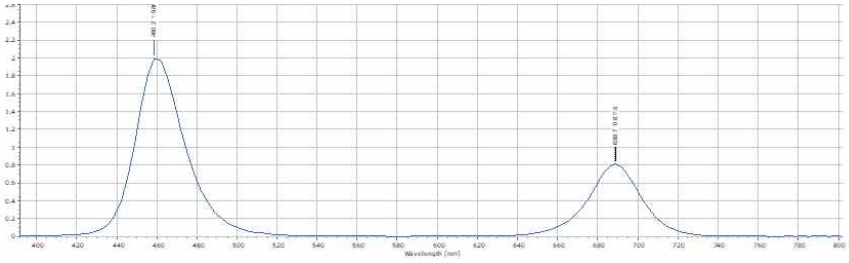


[실험을 위해 준비된 모습 : 왼쪽부터 검은색 양동이, AC-S, 순환 펌프, 역산란 측정기, 정류기, 렌즈 페이퍼, Spectro Radiometer(Hyper-OCR), isopropyl alcohol, Vibrator, 노트북]

KIOST
KOREA INSTITUTE OF
OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

2. 검교정할 역산란 측정기의 관측부를 이소프로필 알콜과 렌즈 페이퍼로 닦고 검은색 절연테이프를 붙여 Dark count를 측정한다. 측정 시에는 1분이상 측정하며, 관측 값의 Median 값을 취한다.

3. Hyper OCR에 역산란 측정기를 마주하여 역산란 측정기로부터 나오는 빛을 관측한다. 실험에 사용된 역산란 측정기는 FLBBRTD 모델로 형광을 측정하기 위한 빛 과 역산란을 측정하기 위한 빛이 방출된다. 이 경우 센서 제조사에서 제시된 사양에는 700nm 파장대의 빛을 사용하여 역산란을 측정한다고 하였으나 HyperOCR로 측정한 결과 중심 파장대가 688.79nm로 확인되었다. 실험 결과는 아래 그래프에서 확인할 수 있다.



[Spectroradiometer를 통해 얻어진
역산란 측정기에서 나오는 빛의 파장대와 각 파장에서의 크기]

4. 관측된 빛의 세기를 분석하여 d(λ)값을 계산한다. 이때 FWHM 값은 아래와 같다.

$$\mathrm{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2}\,c \approx 2.35482\,c.$$

3번의 그래프에서 보이는 2개의 Peak 중 두 번째 Peak가 역산란 측정을 위한 발광원이며, 역산란 측정기의 제원상의 발광원인 700nm와 다르에 Center Wavelength는 688.69이다. 이 때에 FWHM는 27.882이었으며, 따라서 d(λ)는 11.839가 된다.

5. 1번의 순환계를 구성할 때 AC-S의 C(Attenuation) 측정 부분과의 순환만을 구성한다. 검은색 바스켓에 증류수를 채우고 펌프로 순환시키며, 노트북과 연결된 AC-S의 C 관측 값이 일정한지 확인한다.

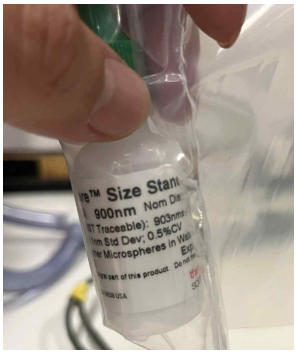
KIOST
KOREA INSTITUTE OF
OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

6. 200nm NIST beads를 Vibrator로 충분히 흔들어 농도를 일정하게 만들고, 검은색 바스켓에 일정한 양을 떨어트린 후 역산란 측정기와 AC-S를 통해 C값과 bb값을 측정한다. 이 실험에서는 0, 10, 20, 40 방울을 떨어트린 후 값을 측정하였다. 각 관측 시에는 1분이상을 측정하여 그 Median값을 취했으며, 값을 측정하기 이전에 충분이 순환시켜 증류수 안에 beads의 농도가 일정하도록 하였다.

7. 실험에 사용된 Duke scientific NIST traceable Nanosphere Size standard polystyrene beads는 그 크기와 크기에 따른 분산이 일정하고 이를 아래와 같은 수식으로 제공하고 있다.

$$n(D) = \frac{N_0}{\sigma\sqrt{2\pi}}\,e^{-\frac{(D-\bar{D})^2}{2\sigma^2}}$$

이는 제공되고 있는 제품의 포장에서도 잘 나타난다.



[NIST traceable Size standard polystyrene beads 의
포장지에 표기된 입자 크기와 그 분산]

polystyrene beads의 refraction 인덱스는 Jones et al., 2013에서 제시한 다음 방정식이 사용되었다.

$$n_{air}(\lambda_{air}) = 1.5718 + \frac{0.008412}{\lambda_{air}^2} + \frac{0.000235}{\lambda_{air}^4} + 0.0003i.$$

8. 검증을 위해 900nm NIST beads를 Vibrator로 충분히 흔들어 농도를 일정하게 만들고, 검은색 바스켓에 일정한 양을 떨어트린 후 역산란 측정기와 AC-S를 통해 C값과 bb값을 측정한다. 이 실험에서는 200nm beads가 들어있는 증류수에 900nm beads를 0, 15, 30, 60 방울을 떨어트린 후 값을 측정하였다. 각 관측 시에는 1분이상을 측정하여 그 Median값을 취했으며, 값을 측정하기 이전에 충분이 순환 시켜 증류수 안에 beads의 농도가 일정하도록 하였다.

KIOST KOREA INSTITUTE OF OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

다. 이론적인 계산 방법

얻어진 값들은 Mie code를 통해 이론적인 값을 계산하기 위해 사용된다. 또한 Sullivan et al., 2013과 같은 문헌을 통해 각 역산란 측정기의 Centroid angle을 파악하여야 한다. 아래의 코드를 실행하여 계산된 값은 이론적으로 계산되어 나오는 값으로 이를 실제 측정하여 얻어진 값의 기울기를 이용하여 Scale factor를 계산하는데 사용된다.

사용된 Mie code는 다음과 같다.(Matlab code, e.g. Bohren and Huffman, 1987) 붉은색 코드 부분은 실험결과 또는 사용된 실험 도구에 따라 수정되어야 한다.

```
% program to see how bead should differ if theta_0 and D_theta are fixed.
```

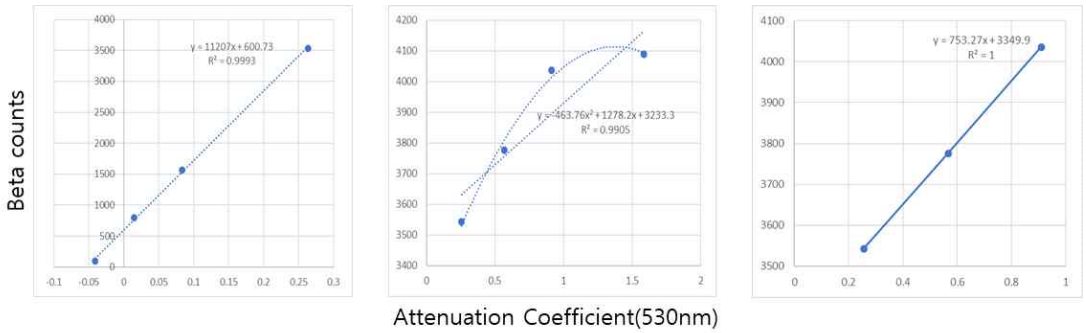
```
% in this program, size of beads and wavelength of sensor are nominal (that
% is we ignore the fact that it varies.
clear all
close all

%angular range and resolution for computation
ang=[0:1:180];
dtheta=1;

%BEADS
% bead size in um
D0=[0.9];% 0.7];
%uncertainty in bead size in um
err_D0=[0.004];%, 0.006];

%bead PSD stdev in micron
delta_D0=[0.0041];% 0.0049];

%sensor wavelegth
lambda0=688.69;                                    % %centroid value
d_lambda=27.882/2.355; %standard deviation

%assumed centroid angle
theta0=142; %degrees
d_theta0=40/2.355; %Standard deviation

%DATA from lab:
% beta_over_c544=[1.67E+03, 232.5111];
%Information on transmissometer used
%wavelength in nm in air:
lambda_c=530;%530
%wavelength dipersion nm in air (FWHM):
delta_lambda_c=14;%14

%compute the beam attenuation of the beads (nominal output does not take
%into consideration the PSD of the beads and acceptance angle).
for i=1:length(D0) %loop on bead size
    [c_model(i), c_nominal(i)]=Beam_c_beads(D0(i),delta_D0(i),lambda_c,delta_lambda_c,0.93);
    %compute the VSF of the nominal beads for all angles in the back
    %direction. Later weigh them by angular response
    VSF1(i,:)=VSF_beads_WF(D0(i), delta_D0(i), lambda0, d_lambda, ang,0);
    VSF2(i,:)=VSF_beads_WF(D0(i), delta_D0(i), lambda0, d_lambda, ang,1); %nominal wl and D
    VSF3(i,:)=VSF_beads_WF(D0(i), 0, lambda0, d_lambda, ang,0); %nominal D
    %compute weighted beta for different nominal angular angles and width of
    %angular response
    %Full monty
    W1=exp(-0.5*((ang-theta0)/d_theta0).^2);
```

KIOST
KOREA INSTITUTE OF
OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

```
    y1=2*pi*VSF1(i,:).*W1*dtheta;
    y2=2*pi.*W1*dtheta;
    theo_output(1,i)=integrate(y1,dtheta,length(ang))/integrate(y2,dtheta,length(ang))./c_model(i);

    %nominal wl and D but not theta
    y1=2*pi*VSF2(i,:).*W1*dtheta;
    y2=2*pi.*W1*dtheta;
    theo_output(2,i)=integrate(y1,dtheta,length(ang))/integrate(y2,dtheta,length(ang))./c_model(i);

    %nominal D but not theta and wl
    y1=2*pi*VSF3(i,:).*W1*dtheta;
    y2=2*pi.*W1*dtheta;
    theo_output(3,i)=integrate(y1,dtheta,length(ang))/integrate(y2,dtheta,length(ang))./c_model(i);

    %full nominal
    W1=exp(-((ang-theta0)/1).^2);
    y1=2*pi*VSF2(i,:).*W1*dtheta;
    y2=2*pi.*W1*dtheta;
    theo_output(4,i)=integrate(y1,dtheta,length(ang))/integrate(y2,dtheta,length(ang))./c_model(i);
end
 format shortEng
 theo_output'
function intgr=integrate(y,dx,N)
%function to perform an integral of y with respect to x, with dx the
%increment and N the total number of y's to integrate.
intgr=3/8*(y(1)+y(N))+7/6*(y(2)+y(N-1))+23/24*(y(3)+y(N-2));
intgr=(intgr+sum(y(4:N-3)))*dx;
end
```

KIOST
KOREA INSTITUTE OF
OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

3. 결과 및 토의



[200nm beads를 사용하여 얻은 Beta counts와 Attenuation Coefficient(530nm) 값(좌)과 900nm beads를 사용하여 얻은 Beta counts와 Attenuation Coefficient(530nm) 값(중앙, 우)]

200nm NIST beads를 사용하여 얻은 결과에서 기울기 값은 11207이었으며, R^2값은 0.9993으로 매우 높은 선형 상관관계를 보였다. 900nm beads를 사용하여 얻은 결과에서는 60 방울을 떨어트렸을 때 센서의 관측한계를 넘어 Saturation 되는 것을 확인 할 수 있었다. 이에 마지막 60 방울을 떨어트렸을 때의 관측 값을 배제하고 3개의 관측값만을 사용하여 계산한 결과 기울기는 753.27이었으며, R^2값은 1로 매우 높은 상관관계를 보였다.

	FLBBRTD 3698				Theoridical value	
1	200nm size beads	median of beta(700) – median of Dark count	median of C(530nm)	Slope	Mie	A
	0 drop	98	-0.0408	1.12E+04	2.24E-02	2.00E-06
	10 drops	800	0.014714			
	20 drops	1567	0.08359787			
	40 drops	3535	0.263462			
2	900nm size beads	median of beta(700) - median of Dark count	median of C(530nm)	Slope	Mie	A
	0 drop	3543	0.255749	7.53E+02	1.59E-03	2.12E-06
	15 drops	3776	0.566909			
	30 drops	4036	0.910291			
	60 drops	4090	1.585896			

[전체적인 실험 결과 정리]

Mie theory를 기반으로 하여 역산란 측정기로부터 얻은 Count값을 β 값으로 변환하기 위해서는 Scale factor인 A 값이 필요하다. 이는 아래와 같이 계산된다.

$$A\frac{\beta[counts - dark\ counts]}{C(\lambda_0)} = [\frac{\beta}{C}]_{theory} \text{에서,}$$

$$\beta sr^{-1}m^{-1} = A \bullet \beta[counts - dark\ counts]$$

$$A = \frac{\beta[counts - dark\ counts]}{\beta sr^{-1}m^{-1}}$$

A는 실험적으로 관측된 두 개 값의 상관관계 기울기에 이론적으로 계산된 Mie값을 나누어 얻을 수 있게 된다. 200nm beads를 사용한 실험에서의 A값은 2.00E-6으로 계산되며 실험적으로 얻은 Scale factor이다. 이를 검증하기 위해 사용된 900nm beads 값에서의 A 값은 2.12E-6이다. 이 두 Scale factor 값의 차이는 불과 1.2E-7으로 실험에 사용된 역산란 측정기 FLBBRTD 3698(시리얼 넘버)의 제조사에서 제공된 교정 시트에서 제시한 부정확도 1.4E-7보다 낮은 값이 도출되었다.

KIOST
KOREA INSTITUTE OF
OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

4. 결론

한국해양과학기술원 해양위성센터에서는 다양한 역산란 측정기를 보유하고 있다. ECO-BB9, Hydroscat-6, ECO-Triplet 등이 그들이다. 이런 역산란 측정기를 운용하기 위해서는 기기에 대한 정확한 이해뿐만 아니라 주기적인 검교정이 필수적이다. 그러나 제조사로부터 수행되는 주기적인 검교정은 많은 시간을 소모하며, 많은 비용이 소요되므로 때때로 교정 주기를 무시하고 관측을 수행하게 되기도 한다.

간단한 실험을 통해 얻을 수 있는 Scale Factor의 사용은 여러모로 매우 유용하다. 관측 결과에 대한 품질을 높이고, 관측값을 사용하는 사람에게 관측값의 근거를 제시함으로써 관측값에 대한 신뢰도를 높일 수 있다. 또한 검교정에 사용되는 비용을 절감할 수 있으며, 검교정이 수행되는 동안 장비가 운용되지 못하는 기간을 크게 줄일 수 있다. 또한 원격탐사 또는 광학관측장비의 이론과 실제를 이해하는 데에도 훌륭한 교육 방법이 될 것이다. 다만, 간단한 실험이라고 할지라도 그 준비와 전체적인 계산에는 시간과 노동력이 소요되는 만큼 검교정 수행 계획에 있어서 면밀한 검토가 필요할 것이다.

KIOST
KOREA INSTITUTE OF
OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY

참고문헌

[Journal article]

Bohren, Craig F. “Recurrence relations for the Mie scattering coefficients.“ JOSA A 4.3 (1987): 612-613.

Sullivan, James M., et al. “Measuring optical backscattering in water.“ Light scattering reviews 7. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. 189-224.

[Book]

Bohren, Craig F., and Donald R. Huffman. Absorption and scattering of light by small particles. John Wiley & Sons, 2008.

Hergert, Wolfram, and Thomas Wriedt, eds. The Mie theory: basics and applications. Vol. 169. Springer, 2012.

KIOST
KOREA INSTITUTE OF
OCEAN SCIENCE & TECHNOLOGY