

# 초고주파 라디오미터 센서를 이용한 적조 관측 실험

김용훈\*, 김성현, 박혁, 최준호, 이호진, 최승운, 최재연, 서승원

광주과학기술원 기전공학과

광주광역시 북구 오룡동 1번지 500-712

Tel: 062-970-2387, Fax: 062-970-2384, E-mail: yhkim@kjist.ac.kr

## 요약문

심각한 환경문재인 적조 피해를 줄이기 위해서 효과적인 모니터링 기술이 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서는 초고주파 라디오미터 센서를 이용한 효과적인 적조 모니터링에 대한 가능성을 조사하였다. 초고주파 라디오미터를 이용해 관측되는 밝기 온도의 차이로 적조 해수를 모니터링 할 수 있다는 아이디어에 기반하여 연구를 수행하였다. 본문에서는 이론적인 배경과 가능성 확인을 위한 실험과정, 결과가 서술되어 있다. 실제 해양에서의 측정 실험에서 적조지역의 밝기 온도가 청정지역의 밝기 온도보다 높게 측정되었다. 결론으로, 본 연구를 통하여 초고주파 라디오미터를 이용한 적조 모니터링이 가능함을 확인하였다.

## 1. 서론

해양 동식물 플랑크톤이 일시에 대량 번식하거나 집적됨으로써 바닷물이 변하는 적조현상은 연안 해양 생태계에 심각한 영향을 끼치는 환경 문제로서 국내에서도 매년 양식어장 등에 큰 피해를 주고 있다. 최근의 적조발생은 시공간적으로 일정하지 않고 여러 가지 환경요소에 따라 다양한 발생 경향을 보이고 있다. 이에 적조로 인한 피해를 줄이기 위해서는 적조의 조기 발견과 단기간의 시공간적 이동 및 발전 상황에 대한 효과적인 모니터링 기술이 절실히 요구되고 있다. 또한 적조 발생과 기타 환경적 인자들과의 상관 연구를 위해서도 적조탐색 기술의 필요성이 대두되고 있다.[1]

최근의 적조 모니터링에 대한 연구는 지

구 탐사위성의 원격탐사기법을 이용하여 이루어지고 있다. 이러한 방법들은 주로 가시광선 대역의 해색 관측 센서와 적외선 대역에 치중되어 있다. 위 방법들은 적조 발생지역의 해수에는 플랑크톤의 농도가 높아 주위의 해수와는 다른 색을 띄는 광학적 특성과 적조 발생은 해수 표면의 온도와 관련이 있다는 온도 특성에 기인한다.[2] 현재 이러한 특성을 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 인공위성 탑재 가시광선/적외선 대역의 원격탐사 센서를 이용하는 경우 시공간 및 기상에 의한 제약을 가지고 있다. 즉 인공위성의 공전 궤도와 주기에 의한 시공간적 제한과 구름, 우천 시와 같이 관측이 힘든 가시광선/적외선 센서의 제한이 위 방법의 단점이라고 할 수 있다.[3]

본 연구는 초고주파 라디오미터 센서를

이용한 효과적인 적조 모니터링에 대한 가능성을 조사하는 데에 목적이 있다. 초고주파 라디오미터는 관측되는 Field of view (FOV)의 초고주파 대역 방사 정보를 제공하는 센서이다. 출력값인 밝기 온도는 관측되는 물질의 특성에 따라 다른 값을 나타낸다. 즉, 밝기온도는 물질의 물리적 온도, 방사특성, 반사율 등의 특성에 따라 다르게 측정되기 때문에 이를 이용하여 관측물의 감지, 분류가 가능하다. 본 연구의 기본 개념은 적조 생물을 포함한 해수와 포함하지 않는 해수의 밝기 온도차를 측정하는 데에 있다. 적조 해수의 초고주파 방사 경향은 적조 생물에 의해 청정 해수와는 다를 것이고 이러한 다른 방사 경향은 초고주파 라디오미터에 의해 밝기 온도의 차이로 감지될 수 있다. 이러한 점에 착안하여 초고주파 라디오미터 센서를 이용한 효과적인 적조 모니터링의 가능성에 대한 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 이론적인 연구와 실험을 통해 초고주파를 이용한 적조 모니터링의 가능성에 대해 알아보았다. 실험은 실제 해양에서의 적조지역과 청정지역을 측정하였다. 실험은 L-band (1.5 GHz center frequency) 와 W-band (94 GHz center frequency) 의 라디오미터를 이용해 실시되었다. 양쪽의 실험 결과 모두 적조지역의 밝기 온도가 청정지역의 밝기 온도보다 높게 측정되었다. 자세한 이론적 근거와 구체적인 실험 과정, 결과 등이 본문에서 서술된다.

## 2. 측정 원리 및 방법

### 2.1 라디오미터 기본 원리 [4]

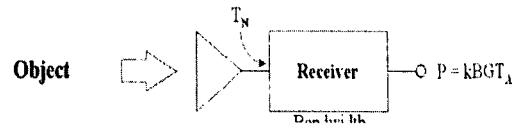


그림 1. 라디오미터 원리

라디오미터는 순수하게 물체에서 방사되는 마이크로파 및 밀리미터파 대역의 자연 에너지(잡음 신호)를 광대역, 저잡음, 고안정의 수신기를 이용하여 물체의 밝기 온도(Brightness temperature : BT)를 측정하는 센서 시스템이다. 라디오미터의 기본 원리는 그림 1에서 보여준다. 라디오미터는 안테나를 이용하여 물체에서 방출되는 마이크로파 및 밀리미터파 대역의 복사 에너지를 전기적 신호로 측정하고, 이를 보정 시스템을 이용하여 측정된 전기적 신호와 보정 물체의 밝기 온도와와의 관계를 구함으로서 밝기 온도를 측정하게 된다.

라디오미터는 측정 물체에서 방출되는 잡음 레벨에 가까운 복사 에너지를 검출하기 때문에, 측정 데이터가 시스템 내부 및 외부 잡음에 대해 거의 영향이 없도록 설계되어야 하며, 측정 물체의 미세한 온도차를 검출하기 위해서는 민감도(Sensitivity)가 매우 좋도록 설계되어야 한다. 식 1은 안테나로 입사된 에너지와 라디오미터 수신기의 출력과의 관계를 보여준다.

$$P = kBGT_A \quad (1)$$

여기에서  $k$ 는 Boltzman constant ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K),  $B$ 는 라디오미터 수신기 잡음 대역폭,  $G$ 는 라디오미터 수신기 전체 이득,  $T_A$ 는 수신된 안테나 잡음 온도

(Antenna temperature)이다. 또한 라디오미터는 수신기 자체에서 수신기 잡음 온도( $T_N$ )를 발생시키므로, 최종적인 라디오미터 수신기의 출력( $P$ )은 안테나 잡음 온도와 수신기 잡음 온도의 합에 영향을 받으며 아래와 같이 표현된다.

$$P = kB G (T_A + T_N) \quad (2)$$

수신기 잡음 온도( $T_N$ )는 라디오미터 보정 시스템 및 보정 알고리즘에 의해 상쇄되며, 최종적으로 원하는 잡음 신호인 안테나 잡음 온도, 즉 목표물의 밝기 온도를 얻을 수 있다. 식 (3)은 라디오미터의 민감도를 나타낸다.

$$\Delta T = \frac{T_A + T_N}{\sqrt{B \cdot \tau}} \quad (3)$$

여기에서  $B$ 는 수신기 대역폭,  $\tau$ 는 인터그레이션 시간(Integration time)이다. 따라서 측정 물체의 온도 분해능을 향상시키기 위해서는 수신기가 저잡음의 특성을 지녀야 하며, 또한 수신기의 대역폭과 인터그레이션 시간을 증가시킴으로써 민감도를 향상시킬 수 있다.

## 2.2 적조 관측 원리

라디오미터에 입사된 에너지는 안테나 FOV내 측정 물체의 에너지 뿐 만 아니라 물체 주위 온도원에 의해 반사된 에너지도 포함하게 된다. 따라서 수신된 안테나 잡음 온도는 목표물 자체의 밝기 온도와 목표물에 의해 반사된 외부 온도 즉 Sky temperature의 합으로 구성되며 식 (4)와 같다.[5]

$$\begin{aligned} T_A &= \epsilon T_{object} + \rho T_{source} \\ T_B &= \epsilon T_{object} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서  $T_{object}$ 는 물체의 온도 (Physical Temperature),  $T_{source}$ 는 외부 온도이며,  $\epsilon$ 과  $\rho$ 는 측정 물체의 방사율 (Emissivity)과 반사율(Reflectivity)을 각각 나타낸다. 측정 물체의 실제 밝기 온도는 물체의 온도와 측정 물체의 반사율과의 관계에 의해 구해지며, 라디오미터 수신기에서는 이러한 목표물의 밝기 온도 및 목표물에 반사된 외부 온도와와의 합이 입사되게 된다. 따라서 물체의 밝기 온도를 정확히 측정하기 위해서는 외부 온도에 대한 정확한 측정과 측정 물체에 대한 정확한 방사율 및 반사율을 구해야 한다. 본 연구에서는 외부 온도원(Sky temperature)가 일정한 조건하에서 청정 해수와 적조 해수의 안테나 잡음 온도를 비교하였다. 즉 적조 해수의 방사율과 반사율의 변화로 인한 밝기 온도 차이를 측정, 분석하였다.

측정 물체의 밝기 온도의 특성을 나타내주는 방사율과 반사율은 수신기 중심 주파수 및 수신 각도(Look angle), polarization, 그리고 표면 상태(Surface roughness)에 따라 달라진다. 본 연구에서 사용된 수신기의 중심 주파수는 L-band 와 W-band 이며, 측정시 수신 각도 및 polarization은 일치시켰다. 바닷물의 온도는 디지털 온도계를 이용하여 청정 해수 및 적조 해수 온도를 측정하였고, 두 지역 사이가 근거리로 인해 표면 거칠기는 일정하다고 가정하고 실험을 진행하였다.

### 2.3 라디오미터 설계 [6]

설계된 주파수 대역은 일반적으로 토양 습도, 염도, 해수 표면 온도 등에 사용되는 L-band 와 구름 수분 함유량, 눈, 비의 파라미터 측정에 W-band 이다. 본 연구는 적조 실험의 feasibility study 단계로서, 대기 감쇄가 적은 window 채널 중 바닷물의 skin depth가 크게 차이가 나는 두 주파수 대역을 이용하여 분석하였다.

설계된 다중 채널 라디오미터의 구조는 그림 2와 같다. L-band 라디오미터는 국부 발진기(LO)를 사용하지 않는 direct 수신기 구조를 가지며, pyramidal Horn 안테나를 사용하였다. 라디오미터의 중심 주파수는 1.5 GHz, 잡음 대역폭은 300 MHz 그리고 민감도는 1 K이다. W-band 라디오미터는 국부 발진기 및 IF 신호 대역을 사용하는 슈퍼헤테로다인(Superheterodyne) 구조로 설계되었으며, 카세그레인 안테나를 사용하였다. 중심 주파수는 94 GHz, 잡음 대역폭은 3 GHz, 민감도는 0.6 K이다. 라디오미터에 의해 측정된 밝기 온도는 데이터 획득 장치를 통해 컴퓨터에 저장되며, 표 1은 설계된 L-band 및 W-band 라디오미터의 규격을 보여준다.

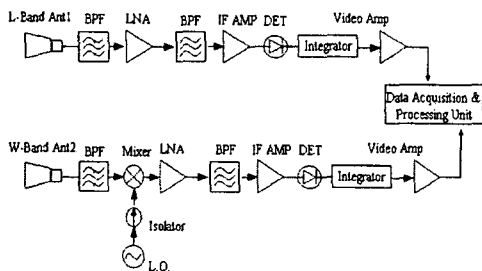


그림 2. L/W-band 라디오미터 구조

표 1. L/W-band 라디오미터 규격

Parameter	W-band Radiometer	L-band Radiometer
중심 주파수	94 GHz	1.5 GHz
잡음 대역폭	3 GHz	300 MHz
민감도	$T < 0.6 K$	$T < 1 K$
인TEGR레이션 시간	400 ms	400 ms
안테나	Cassegrain	Horn
라디오미터 수신기 구조	Superheterodyne	Direct receiver

### 3. 실험 결과

라디오미터를 이용한 적조 관측 실험은 적조 주의보가 발령된 경남 고성군 하이면 앞바다에서 2003년 8월 22일과 9월 5



그림 3. 적조관측지역

일 2회에 걸쳐 실시되었다. 맑은 날씨에 적조 주의보가 발령된 장소에서 선박을 이용하여 적조 해수 지역과 청정 해수 지역을 반복적으로 이동하면서 실험을 진행하였다. 그림 4는 다중 채널 라디오미터가 설치된 선박 및 설치된 모습을 보여준다.

라디오미터의 입사각은 수평각 기준으로  $30^\circ$  이며, 관측시의 바닷물 평균 온도는  $25^\circ C$ 로서 청정 해수 및 적조 해수의



그림 4. 라디오미터 실험 장치 설치

수는 차이는 크지 않았다. 실제 적조 유무를 라디오미터 측정값과 비교, 분석하기 위해 두 지역에서 해수 샘플을 획득하였으며, 또한 카메라를 이용하여 양 지역의 해색을 측정하였다. 매 측정시 약 10분간 양 지역을 측정하였으며, 측정값은 hot source(300K)를 기준으로 정규화된 밝기 온도 값으로 환산된다.

그림 5는 W-band 라디오미터를 이용한 측정 결과를 나타낸다. 적조 해수의 밝기 온도가 청정 해수의 밝기 온도보다 크게 측정되었음을 보여준다. 그림 6은 L-band 라디오미터를 이용한 적조 실험 결과를 보여 준다. 측정 결과에서 적조 해수의 밝기 온도가 청정 해수의 밝기 온도보다 큼을 알 수 있다. 따라서 위 결과를 통해 라디오미터를 이용한 적조 관측이 가능함을 보여준다.

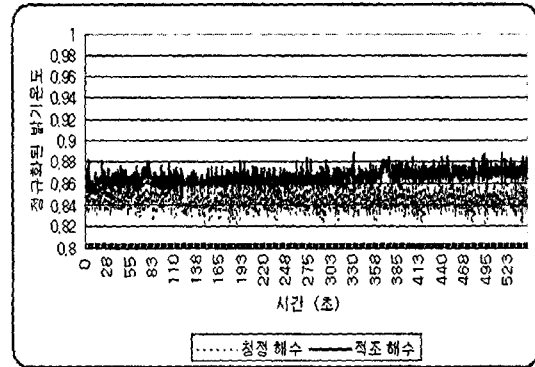


그림 5. W-band 라디오미터 측정 결과

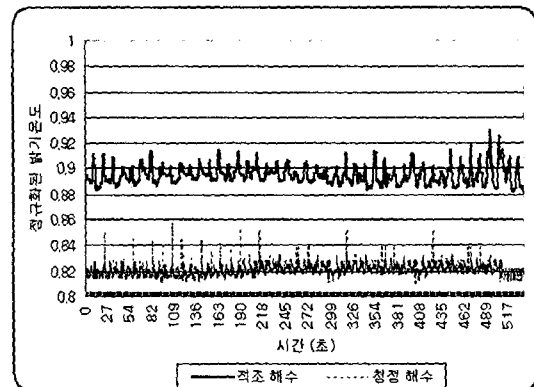


그림 6. L-band 라디오미터 측정 결과

#### 4. 토의 및 결론

본 연구는 라디오미터를 이용한 적조 모니터링의 선행 연구 단계로서 이론적인 분석과 실제 설계된 라디오미터를 이용한 실험을 병행하였다. 설계된 다중 라디오미터를 이용하여, 적조 관측을 한 결과 청정 지역과 적조 지역과의 측정 값이 명확히 구분되었으며, 이를 통해 라디오미터를 이용한 적조 모니터링이 가능함을 보여준다.

좀 더 효과적으로 라디오미터를 이용한 적조 모니터링 기술을 개발하기 위해서는 다음과 같은 연구가 계속되어야 할 것이다. 먼저 실험실의 제한된 환경 내에서의 적조 관측 실험이 부가되어야 한다. 이러한 실험을 통하여 적조의 주파수 채널 특성, 수신 각도 그리고 polarization에 대한 특성을 분석함으로써 최적의 적조 측정 환경을 구성할 수 있을 것이다. 또한 실제 적조 모니터링에 라디오미터가 이용될 경우 관측 플랫폼 및 운용 방법에 대한 연구도 계속되어야 할 것이다.

#### 사사

본 연구는 “광주과학기술원 환경모니터링 신기술 연구센터”와 “BK21 사업”의 지원으로 수행되었으며 아낌없는 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

[1] 서영상, 김정희, 김학균, “NOAA 위성자료에 의한 해수표면 수온분포와

Cochlodinium polykrikoides 적조 발생의 상관성”, *한국환경과학회지* 제 9권 3호, 215~221, 2000

- [2] W.G. Huang, X.L. Lou, "A Method for Detecting Red Tide Using AVHRR Imagery", *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International , Volume: 6 , 9-13 July 2001
- [3] 유신재, 정종철, “해양환경관측을 위한 원격탐사의 활용과 그 전망”, *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, Vol. 15, No. 3, 1999, 277~288
- [4] Skou, Neils, *Microwave Radiometer Systems : Design and Analysis*, Artech House
- [5] Ulaby, Fawwaz T., *Microwave Remote Sensing*, Artech House
- [6] Kim, Yonghoon, *Design of 90 GHz Band Radiometer System for Remote Sensing Applications*, *Proceeding of International Symposium on Remote Sensing* 2001, pp329-333