

# 연안해역의 해양오염예측을 위한 원격탐측기법 적용 연구 Using Remote Sensing in Forecasting Appearance of Oceanic Pollutions on the Coast

정영동\* · 김진기\*\*

Jung, Young-Dong · Kim, Jin-Gi

## 요 旨

적조에 관한 조사는 육안과 샘플링에 의한 현지조사에 의해 일반적으로 진행되고 있다. 이와 같은 기존의 조사와 분석방법은 적조의 발생과 소멸까지의 경로를 정확하게 예측하기 곤란하였다. 이에 좀더 객관적이고 과학적인 방법으로 적조의 발생과 그 이동경로 등 시·공간적인 환경인자를 분석해 볼 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 적조발생에 대한 피해를 최소화하기 위해 원격탐측기법을 적용하였다. 적조의 주요 원인이 되는 해수 온도의 변화, 조류의 변화 등을 자료와 탐측데이터를 활용하였으며, 육지로부터 유입되는 부하물질 등의 적조원인 데이터를 해석함으로써 남해연안에 발생하는 적조의 현상을 사전에 예측하는 기법을 연구하였으며 그 활용가능성을 제시하고자 하였다.

## ABSTRACT

The research on Harmful Algal Blooms is generally in progress through field work, such as the naked eye and sampling. It was difficult to forecast exactly the course, from appearance of red tide to disappearance, with the established ways of investigation and analysis. Accordingly it is need to analyze environmental factors in time and space, the appearance of red tide and the path of its migration by more objective and scientific methods. In this study The remote sensing was used to diminish damage from the occurrence of red tide. Such as a temperature change of sea water and a change of tidal currents, the major cause for red tide The probed data were utilized. The technique for forecast of red tide phenomenon on the south coast was researched by analyzing the cause of red tide, pollutant flowed from land and the possibility of application of the technique was showed.

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경과 목적

적조현상이란 바다의 플랑크톤이 일시에 대량번식하거나 집적됨으로서 바다물의 색이 붉은색과 황녹색으로 변하는 현상으로서 오랜 옛날부터 자연적으로 발생하였다.<sup>1)</sup> 그러나 최근에는 연안도시와 임해공업단지 등 임해산업의 발달과 여기서 발생한 각종 오염물질이 연안해역으로 유입되어 적조현상의 발생빈도가 늘어나거나 그 기간도 길어짐으로서 연안의 어민에게 대량피해를 주고 있는 현상을 말한다. 과거에 일반적으로 적용하였던 적조 조사는 선박과 항공기를 이용한 현지답사에 의해 조사함

으로 인해 조사에 대한 결과도는 기존의 도면을 이용한 보고와 상황판단으로 이뤄져왔다. 그러나 최근 이와 같은 기존의 도면에 의한 조사와 분석방법은 적조발생의 흐름과 경로를 정확하게 예측하기 곤란함으로 좀더 객관적이고 과학적인 방법으로 적조의 발생원인과 그 이동경로 등 시·공간적인 환경인자를 분석할 필요성이 대두되고 있다. 따라서 최근 국립해양수산진흥원을 주 기관으로 원격탐측과 지리정보시스템을 적용한 적조 및 해양오염관련 연구를 수행함으로써 그 효과에 대한 기대와 효용성을 입증하고 있다.<sup>2)</sup>

현재의 적조원인에 대한 연구는 화학 및 생물학적 원인의 규명에 대해 그 초점이 맞추어져 있어 적조의 발생 원인과 흔적에 관한 지리학적인 원인의 규명과 좀 더 객관적이고 과학적인 방법으로서 인공위성에 의한 탐측자료를 이용하는 방법과 지리정보시스템을 적용할 필요성

\*조선대학교 토목과 교수

\*\*여수공업대학 토목과 전임강사

이 대두되고 있다.

따라서 본 연구에서는 적조발생에 대한 피해를 최소화하기 위해 원격탐측 기법을 적용하여 적조의 주요 원인이 되는 해수 온도의 변화, 조류의 변화, 육지로부터 유입되는 강수량 및 부하물질 등의 적조원인 데이터를 해석함으로써 남해연안에 발생하는 적조의 현상을 사전에 예측하는 기법을 연구하고자 한다. 실제 연구에서는 NOAA(National Oceanographic and Atmospheric Administration)와 SEAWIFS 등의 인공위성에 의한 탐측 자료를 활용함으로써 해역의 정확한 위치를 기준으로 적조원인원인 염분, 해수온도, 클로로필 농도 등의 자료를 취득하여 적조해역을 분석하였다.

적조의 발생과 이동경로를 파악하기 위해서는 광역적이고 정량적인 자료를 제공하는 위성영상과 주제별 연안해역의 자료를 레이어별 및 가시화가 가능한 GIS의 응용이 필수로 간주된다. 나아가 현재의 위성원격탐측자료는 수온과 클로로필과 같은 환경인자를 실측하지 않고 신속하고 효율적으로 파악하는데 유용하게 활용되고 있다.<sup>3),4)</sup> 일반적인 연안해역의 환경분석 등은 NOAA(AVHRR)과 Orbview-2(SeaWiFS)를 이용했으며, 차후 연구에서는 적조의 이동경로를 원격탐측과 해양지리정보시스템(OGIS:Oceanic Geographic Information System)을 이용하여 분석, 도출하고자 하며, 이때 연안해역의 공간데이터를 미세한 부분까지 획득해야 함으로 공간분해능이 30m인 LANDSAT/TM을 병행 적용하고자 한다. 그림 1은 본 연구의 진행 내용이다.

### 1.2 연구지 해석

본 연구에서는 원격탐측 자료를 이용하여 적조에 관한 원인 및 경로를 판단하기 위해 실제의 자료와 분석기법을 적용하며 남해연안 해역의 적조현상에 대한 알고리즘

을 제시하기 위해 국내 연안 해역 중 양식업을 많이 하는 여수만 일대를 연구의 공간적인 범위로 정하였다. 여수와 광양만은 우리 나라의 남북 축을 기준으로 했을 때 N128°에 위치하는 남해안의 중심해안지구이다. 특히 여수만은 1970년 초에 완성된 대표적인 국가 화학공업단지인 여천산업단지를 끼고 있어 화학물질에 의한 폐수의 해역 유입 논란이 끊이지 않은 지역으로 인근 연안 해역에서 수산관련업을 그림 2, 3과 같이 많이 하고 있어 적조발생에 민감한 해역이다.<sup>5)</sup>

광양만은 1987년에 제철 연관 단지를 중심으로 국내 2위의 철강산업도시로서 발전하고 있는 광양과 순천일대

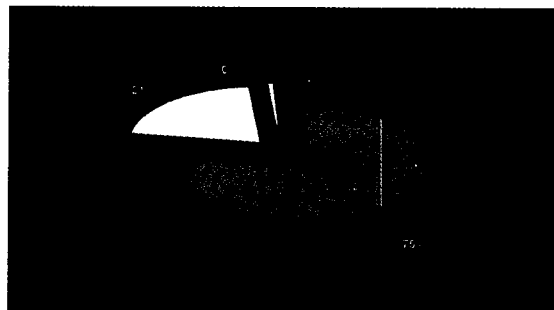


그림 2. 1999년 여수시의 어획량

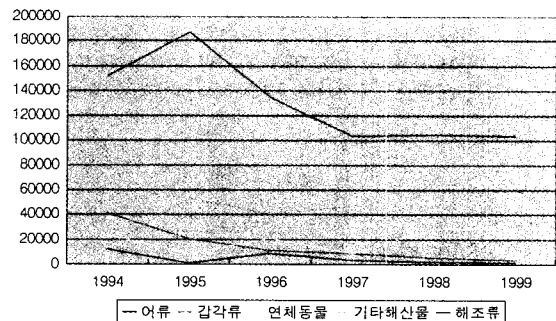


그림 3. 여수시의 어획량의 비교

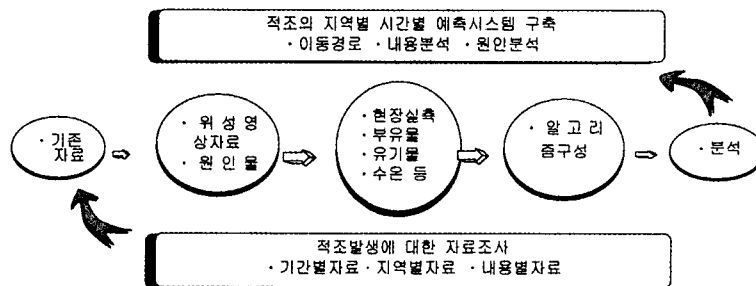


그림 1. 연구내용

표 1. 여수만일대 적조발생현황

년월	내용	1			2			3			4			5			6			7			8			9			발생 빈도	비고 (적조생물)	
		-	-1	-2	-	-1	-2	-	-1	-2	-	-1	-2	-	-1	-2	-	-1	-2	-	-1	-2	-	-1	-2	-	-1	-2			-3
2000	6	○																											7	1. Ceratium furca 2-1. Chaetoceros sp 2-2. Chaetoceros spp 3. Cochlodinium polykrikoides	
	7	○	○																												
	8				○																										
	9				○																										
1999	6																												8	4-1. Gymnodinium sanguineum 4-2. Gymnodinium sp	
	7	○																													
	8		○		○																										
1998	5	○																											15	5. Heterosigma akashiwo 6-1. Noctiluca scintillans 6-2. Noctiluca sp	
	6	○																													
	7	○		○																											
	8			○																											
1997	5			○																									7	7-1. Prorocentrum dentatum 7-2. Prorocentrum sp 7-3. Prorocentrum spp	
	7																														
	8	○		○																											
1996	5				○																								15	7-4. Prorocentrum triestinum 8-1. Skeletonema costatum 8-2. Skeletonema sp 9-1. Thalassiosira decipiens 9-2. Thalassiosira sp 9-3. Thalassiosira spp	
	6																														
	7	○		○			○	○																							
	8	○			○																										
	9			○	○																										
1995	6																												12		
	7																														
	8				○																										
	9	○	○	○	○																										
1994	6																												7		
	7																														
	8		○		○																										
1993	8			○																									3		
	10				○																										
1992																															
1991	6																												2		
	7			○																											

를 끼고 있는 해역으로서 광양제철관련 시설물과 각종 생활부산물인 유기물질의 유입이 상대적으로 많이 발생하는 지역이다. 그리고 이곳은 연안 해역이며 상류부에 위치한 폐쇄성 해역으로 내륙지역에서의 오염 부하량이 클 것으로 예상되는 등의 지리적인 특징을 갖고 있다. 따라서 적조의 환경적인 원인 분석을 위한 내륙지방에서 연안 해역으로 유입되는 부산물의 유입경로를 주로 한 요인 별 분석, 수질에 대한 특성 등을 원격탐사자료를 활용하여 분석하고자 한다. 표 1은 1991년부터 2000년까지의 연구지에서 발생하는 적조생물의 현황이며,<sup>1),4),6)</sup> 그림 4와 5는 연구대상지역 및 적조의 발생빈도에 대한 내용이다.

연구지의 적조 발생과 관련된 시기별 빈도 및 강우량, 일조량, 수온, 염분 그리고 해수 중의 질소와 인의 함유량에 따른 대상지의 내용은 그림 5-12와 같다. 그림에서의 값들은 적조발생에 관한 환경인자를 분석하고자 적조의 발생시점을 기준으로 발생해역에 관한 질소와 인 그리고 해수면 온도, 염분 자료, 화학적산소요구량, 부유물질과 기상변화 즉 강우량과 일조량 등에 대한 데이터로서 적조의 원인 분석 자료로 주요한 자료가 된다.<sup>7)</sup>

### 1.3 연구지의 수질환경

본 연구의 성과 도출을 위해 연구지의 수질환경데이터

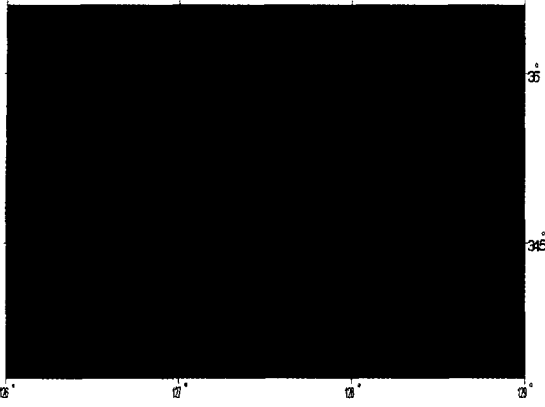


그림 4. 연구대상지역

값은 그림 4의 해양수산부 산하 국립수산진흥원에서 설치운영 중인 해양오염측정망에서의 관측결과를 인용 및 활용하였으며 특히 연구지와 관련이 있는 여수주변해역

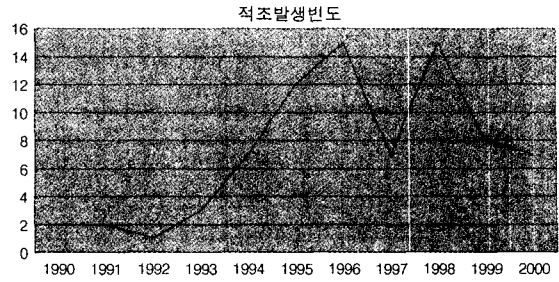


그림 5. 연구지의 적조발생빈도

인 광양만의 묘도 서북방연안, 여자만의 섬달천의 서방연안, 여수만의 돌산도 동방, 돌산도 북방연안과 가막만 입구인 백야도 동방, 여지도 서방연안 등의 6점을 기준으로 표층과 저층해수에 대한 수온, 염분, 인산인 (Dissolved Inorganic Phosphate, Total Phosphate; T-P), 부유물질(Suspended Solid; SS), 화학적산소요구량 (Chemical Oxygen Demand; COD), 무기전질소

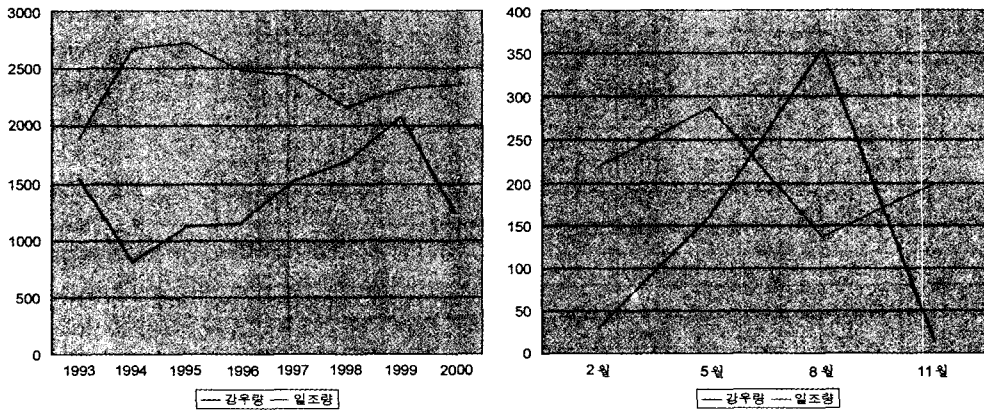


그림 6. 연구지의 강우량 및 입조량

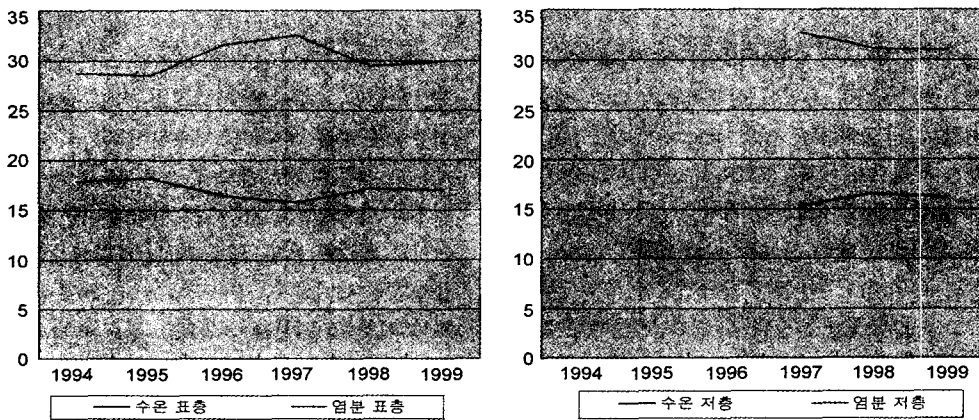


그림 7. 연구지의 수온 및 염분량

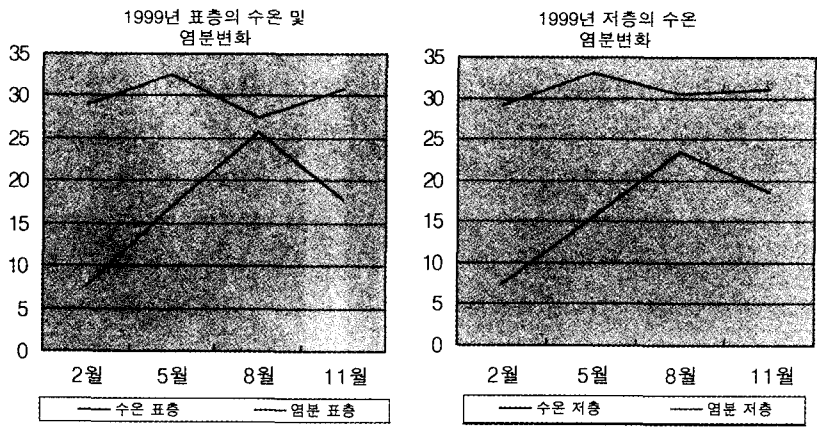


그림 8. 수온 및 염분 변화

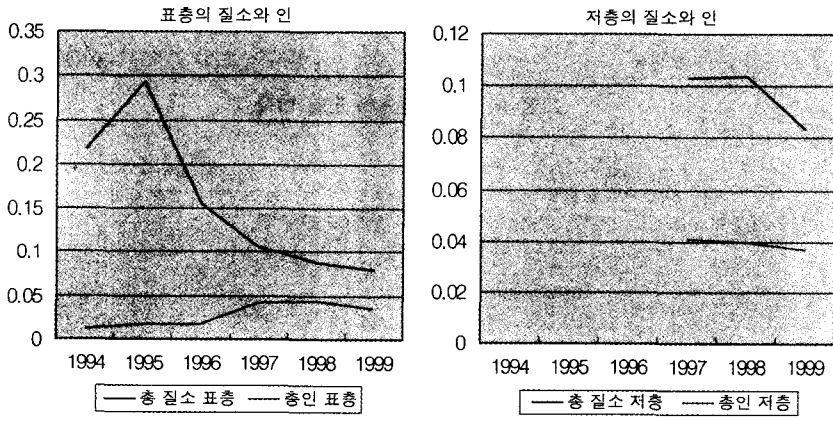


그림 9. 연구지의 질소와 인

(Dissolved Inorganic Nitrogen, Total Nitrogen; T-N) 등의 관측값을 활용하였다. 그림 5는 적조생물의 개체수를 기준한 1990년부터 2000년까지의 적조발생빈도를 나타낸다. 내용 중 95, 96, 98년의 적조발생빈도와 97년의 적조결과와의 내용은 97년엔 상대적으로해수의 저수온 조건과 고염분의 조건에 의한 결과이다. 그리고 그림 6의 강우량과 일조량의 관계에서 강우량은 1993년을 기점으로 1998년까지 808에서 1,696까지 점차 상승하였으며, 일조량은 상대적으로 2,672에서 2,164까지 감소하였다. 표 1의 적조생물발생현황에서 적조의 발생빈도가 높은 1996년을 기준으로 했을 때 평년보다 많은 당해년의 강우량과 적조생물의 생육에 필요한 일조량의 증대요인에 의해 적조의 발생률이 높았음을 알 수 있으며, 강우량의 유입과 일조량 증가로 인한 생물의 활성화강화 및 저염분의 조건으로 인한 적조생물의 생육조건이 좋아

진 원인으로 판단된다. 염분은 그림 7, 8과 같이 연구지의 적조발생빈도와 연관되는 시기인 1994년부터 1999년까지의 표층과 저층의 평균값을 적용하였다. 내용 중 1994년부터 28.81을 기준으로 1997년 32.56으로 점차 증가하였다. 수온은 염분과 상대적인 결과치인 1994년 17.9에서 1997년 15.8임을 알 수 있으며, 적조생물발생현황의 비교표와 대조했을 때 저염분과 고수온의 관계에서 유해성 적조의 발생가능성이 있음을 알 수 있으며, 또한 1999년 당해년을 기준으로 했을 때 분기별 측정값에서도 상대적으로 하절기, 장마철 등 강우량이 집중되는 원인에 의한 저염분의 조건과 적절한 수온대의 하절기인 8월을 전후 한 시기에 적조의 발생빈도가 높음을 알 수 있었다. 그림 9, 10의 질소와 인의 변화에서 표층을 기준으로 한 총질소는 1994년 0.218에서 1998년 0.088로 점차 감

소되었으며 표층을 기준으로 한 총인은 총질소와 상반된 결과로서 1994년 0.013에서 1998년 0.044로 증가되었다. 질소와 인의 관측값과 적조의 발생과의 관련성을 알

수 있으며, 특히 적조의 발생시기인 하절기의 질소와 인의 관측값에서도 각각 동절기엔 0.079에서 0.088로 증가하였고 0.045에서 0.004로 감소되었다. 하절기의 인의 감

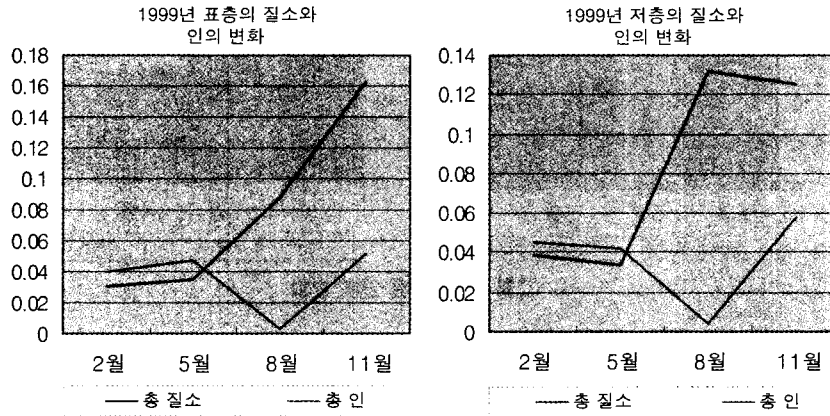


그림 10. '1999 질소와 인의 변화

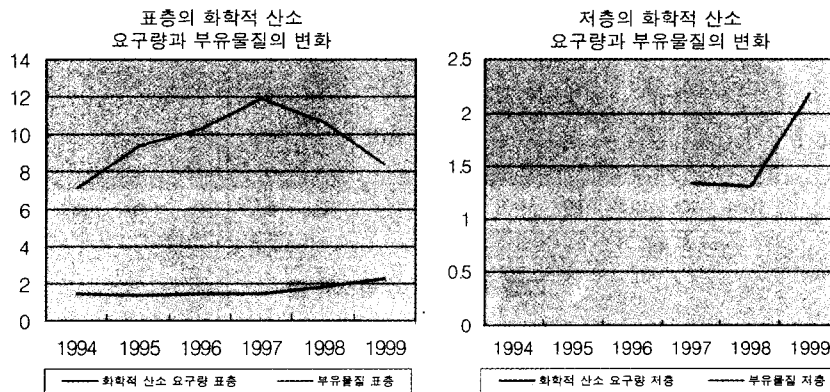


그림 11. 연구지의 화학적산소요구량과 부유물질

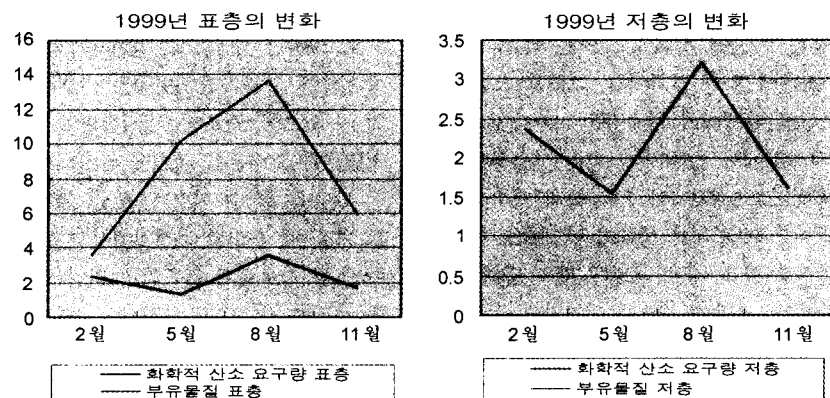


그림 12. '1999 화학적산소요구량 및 부유물질 변화

소는 적조생물의 포식에서, 동시기 질소의 증가는 포식 후 배설 등의 원인에 의한 것으로 해석된다. 위와 같이 적조의 발생에는 강우, 일조량 등과 염분 및 수온 그리고 질소, 인과의 상관관계를 알 수 있었다.

또한 화학적산소요구량은 그림 11에서와 같이 표층을 기준했을때 1994년 1.49에서 1997년까지 큰 변화가 없다가 1998년과 1999년에 2.22까지 증가하였으며, 부유물 질은 1994년 7.1에서 지속적으로 증가하다 1997년 11.9를 정점으로 감소되어 1999년에는 8.4까지 점차 감소됨을 알 수 있다. 특히 그림 12의 월별 변화값에서 적조의 주 발생기인 8월의 화학적 산소요구량이 3.5에서 3개월 전후의 5월과 11월의 관측값이 평균 1.5로 감소됨을 알 수 있다. 이러한 결과값은 8월 기준으로 3개월 전후의 값이 년 중 최저의 값으로서 적조생물의 생육과정과 관련된 중요한 내용이며, 적조의 발생원인규명 및 해석을 위한 정밀 분석을 요구하는 내용이다.

## 2. 결과 및 고찰

### 2.1 수질분석

원격탐측에 의해 취득된 일반적인 영상자료는 정성적인 분석에 여러 가지로 유용하게 적용되어 왔다. 본 연구에서는 위성자료의 분석과 기존의 자료에 의한 데이터의 입력과 함께 현장조사를 병행하여 연구를 실시하였으며, 위성자료에 의한 해수의 평가는 기존 자료 값과 현장실측값 등에 의한 상관관계를 도출하고 기하보정 및 대기보정의 전처리와 끝난 영상자료에 적용하여 수온, 탁도, 색도, 염분 등의 공간적인 농도 분포도를 작성하였다. 과거 연안해역에서 수중광학 측정시 취득된 밴드비율에 의한 값을 영상자료에 적용하며 유기물질의 공간적인 분포도를 파악하기 위하여 위성자료와 현장실측값이 동시에 관측된 영상자료를 이용하였다. 유기물질의 공간적인 분포도는 기존의 많은 연구에서 도출된 수중광학 측정치에 의한 밴드비율 관계식을 현장실측치와 비교하여 수정함으로써 그 정확성을 높이고자 하였으며 연안 해역의 수질평가 항목에 의해 결정된 알고리즘을 영상자료에 적용시켜 유기물질, 엽록소와 부유사, 해수의 탁도와 색도를 정량적으로 평가함으로써 연안 해역에 대한 수질의 공간적인 분포도를 결정하였다.<sup>8),9)</sup>

이때 사용한 영상자료는 적조의 분석을 위하여 미국 해양대기청(National Oceanographic and Atmospheric

Administration)에서 발사 운용중인 NOAA위성 12, 14, 15와 SeaWiFS를 활용하였으며 적용 센서는 5가지 영역의 채널로 구성되어 해양학적 관측 및 분석이 가능한 센서 AVHRR를 활용하였다.

### 2.2 오차보정 및 적조의 이동예측을 위한 수치모델

위성의 궤도운동시 발생하는 위치의 오차원인 tilt, roll, yaw, pitch를 감안하며 위성과 수신국간의 미세시간(1초 이내)차이에 의한 지도상의 위치와 영상자료가 일치하지 않은 경우의 편차를 일치시키고 위성의 고도에 의해 변화되는 지구표면 위치를 기하학적인 방법으로 보정하였다.<sup>4),10)</sup>

적조의 발생과 이동은 발생해역의 해양환경적요인과 생물학적으로 인하여 경로예측에는 많은 어려움이 있다. 따라서 연안해역에서 해류의 용승과 하강현상, 수온 그리고 기타 물리적인 요인을 기존 관측데이터를 활용하여 연안해역별로 예측하고 적조생물의 번식과 확산가능성을 판단하였다. 본 연구에서는 연안과 내만의 3차원 해양순환모델을 사용하기 위한 목적으로 Blumberg and Mellor(1980)에 의해 개발된 수치모델을 보완하여 해류(U, V, W), 수온과 염분, 밀도, 운동에너지, 프랑크톤, 영양염 등의 환경인자를 예측한 결과를 활용하였으며,<sup>4)</sup> 수평방향의 운동방향식은 아래의 두 식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial UW}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M \partial U}{D \partial \sigma} \right) - \frac{gD^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \rho d\sigma + \frac{gD \partial D}{\rho_0 \partial x} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma + F_x \end{aligned} \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2D}{\partial y} + \frac{\partial VW}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M \partial V}{D \partial \sigma} \right) - \frac{gD^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \rho d\sigma + \frac{gD \partial D}{\rho_0 \partial y} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma + F_y \end{aligned} \quad (2-2)$$

수평방향 확산을 나타내는 항들은 다음과 같이 정의된다.

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} (D\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (D\tau_{xy}) \quad (2-3)$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial x} (D\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (D\tau_{yy}) \quad (2-4)$$

그리고 해류속도를 제외한 변수들의 수평방향 확산은

다음과 같이 계산된다.

$$F_{\phi} = \frac{\partial}{\partial x}(Dq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Dq_y) \quad (2-5)$$

$$q_x = A_H \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2-6)$$

$$q_y = A_H \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (2-7)$$

위의 식에서  $\phi$ 는 스칼라 변수인 수온( $\Theta$ ), 염분(S), 운동에너지( $q^2$ ) 그리고 난류메크로 스케일 ( $q^2\lambda$ )를 각각 나타낸다.

특히 해양에서의 운동량과 수온, 염분의 확산은 수치 모델화가 어렵기 때문에 복잡한 해안선과 섬들이 있는 우리나라 남해를 수치모델하기 위해서 혼합상수를 고정된 값으로 적용하기보다는 와류(vorticity)의 세기에 비례하는 Smagorinsky(1963)방식을 적용하였으며, 확산상수를 계산하는 방정식은 다음과 같다.

$$F_1 = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (2-8)$$

$$F_2 = \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (2-9)$$

$$F_{T,S} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial (T, S)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial (T, S)}{\partial y} \right) \quad (2-10)$$

여기서 Smagorinsky확산상수는

$$A_M = C \Delta x \Delta y \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \text{이다.}$$

### 2.3 해수의 수온분석 및 클로로필-a와 적조이동경로 분석

1998년까지 적조의 발생시기와 일치하는 NOAA위성 12, 14호 등에 탑재된 센서 AVHRR의 적외선영역인 Ch.3, Ch.4, Ch.5의 위성자료를 이용하여 한반도 연근해의 수온분포를 추출하였으며, 특히 적조발생해역의 수온을 정밀 분석하여 적조의 적정 수온대를 파악하고자 하였다.

본 연구에서는 열적외선 Channel(3,4,5)의 감지부가 zero radiance energy를 갖는 차가운 우주공간을 감지한 값과 해양표면을 감지한 값 및 NOAA위성 내부에 탑재된 백금 저항온도계 값 등으로 인용하였으며 이를 Lauritson과 Nelson(1979)의 관계식을 이용하여 환산하였다. 일반적인 MCSST(Multi Channel Sea Surface Temperature) 기법으로해수의 수온을 결정할 때 Albedo에 의해 낮과 밤의 공식을 달리 적용한다. Albedo를 고려해야 하는 낮에는 McClain et al.(1985)의 algorithm을 적용하였으며 Albedo가 없는밤에는 Bernstein(1982)의 algorithm을 적용하였으며 NESDIS(National Environmental Satellite Data and Information Service)에서 1995년 3월 개정 발표한 Split-Window의 MCSST공식은 식 (2-11)과 같고 그 계수값은 표 2와 같다.<sup>4)</sup>

$$SST = A \times T_4 + B \times (T_4 - T_5) + C \times (T_4 - T_5) \times (\text{SEC}(sza) - 1) + D \times (\text{SEC}(sza) - 1) + E \quad (2-11)$$

그림 13~19는 근년 중 적조가 극심했던 1998년 9월 15일과 1999년 8월경의 여수만 일대 적조발생 현황을 중심으로 NOAA 12,14,15의 영상자료를 활용하여 IBM Workstation에 의해 AVHRR의 5가지 채널 중 채널 1과 2의 Digital number의 비율값에 의해 가시영역처리와 분석성과이다.

그림 13과 14는 1998년 적조활성기인 9월 15일을 전후한 시기의 남해연안 수온분포도이며, 그리고 그림 15는 동일시기의 적조발생해역인 연구지일대의 클로로필 농도이다. 위의 성과도 13,14,15를 기준으로 연구지를 분석했을 때 여수반도권을 중심으로 적조생물의 생육 조건인 수온 24°C 이상의 수온 분포대임을 알 수 있다. 그리고 9월 15일 경 고히반도권을 중심으로 24°C 이상의 수온대를 형성함으로써 인근해역으로 적조가 확장되었고 9월 24일 이후 여수해역권의 24°C 등온선이 외해로 이동이 되고 22~23°C의 등온선이 여수권에 접근함으로써 적조가 소멸되는 과정을 확인 할 수 있다.

표 2. MCSST공식에 적용하는 계수값

Satellite	Time	A	B	C	D	E(Celsius)
NOAA12	Daytime	1.013674	2.443474	0.314312	0.0	-1.912
	Nighttime	1.013674	2.443474	0.314312	0.0	-0.912
NOAA14	Daytime	1.017342	2.139588	0.779706	0.0	-0.543
	Nighttime	1.029088	2.275385	0.752567	0.0	-1.145



그리고 그림 16은 1998년 9월 15일부터 23일까지 연구지일대에서 적조가 발생했던 일별 현황도를 중첩함으로써 위 기간중의 고히권에서 진입한 적조가 남해 및 통영부근의 연안으로 이동되는 경로를 1매의 성과도로 작성한 것이다.

그림 17~19는 1999년 8월과 9월초를 기준한 연구지 일대의 수온 분포도로서 8월 5일과 7일의 여수반도권의 표층 수온대는 24~25°C로 형성됨을 알 수 있으며 남해 이하 바다에서 27°C의 고온의 수온대가 접근하고 있는 현황을 파악 할 수 있어 점진적인 수온의 상승으로 인해 적조발생을 예측할 수 있는 성과이며, 그림 19는 적조발생해역의 기간별적조 발생도 및 이동경로도이다.

#### 2.4 해수의 색도 분석

일반적으로 위성에 탑재된 센서는 가시광선으로부터 열적외선대까지 넓은 스펙트럼대의 광선을 감지할 수 있

다. 그러나 위성에 탑재된 센서의 분광대가 상대적으로 넓어 정밀도 면에서는 떨어질 우려가 있어 현장 해수면 직하 수심 1~3 m와 해수면 직 상공 30cm지점 등에서

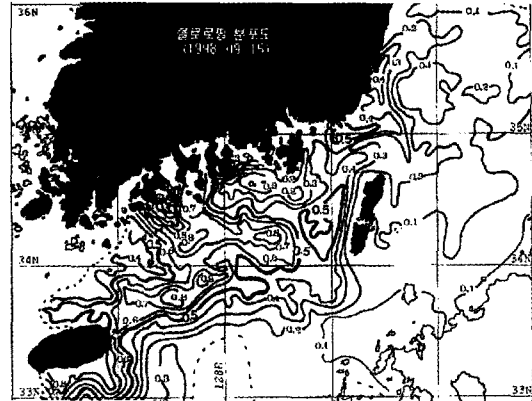


그림 15. 클로로필-a 분포도('1998)

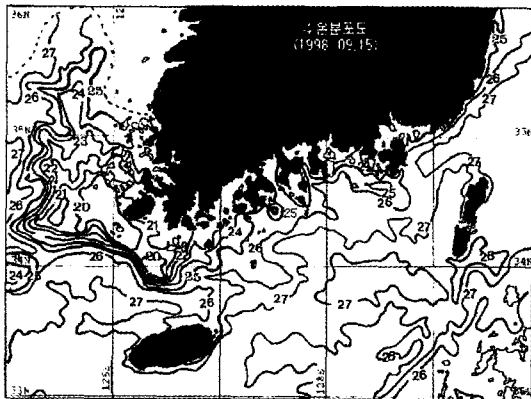


그림 13. 수온분포도('98-1)

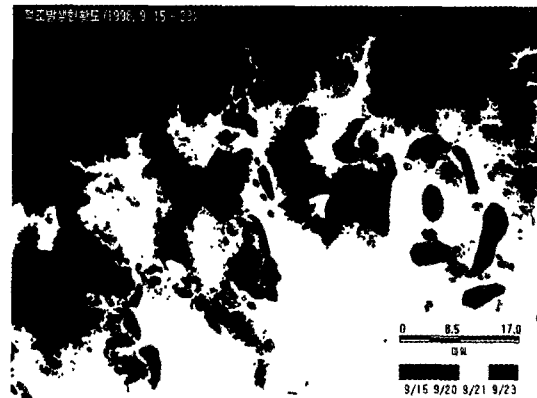


그림 16. '1998 적조이동경로

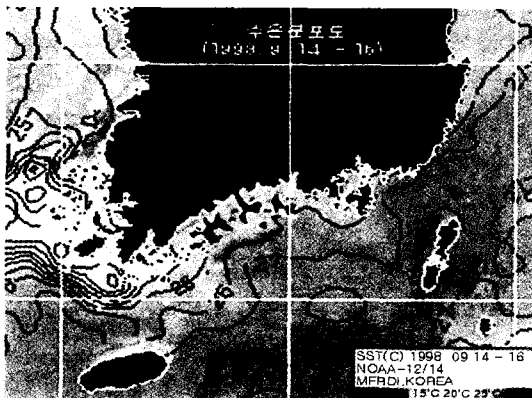


그림 14. 수온분포도('98-2)

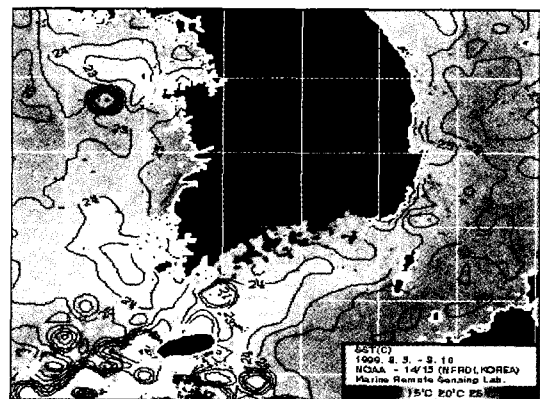


그림 17. 수온분포도('99-1)

의 측정, 확인 절차 및 기존의 실측데이터와 비교 및 조정하여 사용하였으며, 해수에 존재하는 유, 무기물질과 각종 부유물질에 관련된 흡수와 산란현상의 원인에 의해 이들 수피의 표면에서 반사되는 분광량을 기록한 위성자료로부터 해수의 색도 분석을 하였다. 특히 본 연구에서의 적조에 관한 분석에서 개체의 크기가 상대적으로 크고 붉은 색을 많이 띠는 적조생물인 Noctiluca 종의 번식과 이동의 경로 등은 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) channel 1 Digital Number의 비율값을 index로서, NOAA의 AVHRR 가시영역자료의 처리는 Terascan Package(SeaSpace, 1993)를 활용하였다.

### 2.5 해수의 투명도 분석

일반적인 투명도는 해수에 잔존하는 엽록소와 부유사의 흡광과 산란 특성에 의해 수중으로 유입된 광량이 소광되는 정도에 의해 투명도 평가를 할 수 있으며 위성영

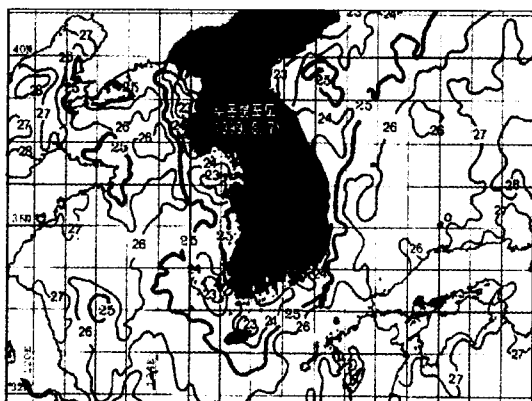


그림 18. 수온분포도('99-2)

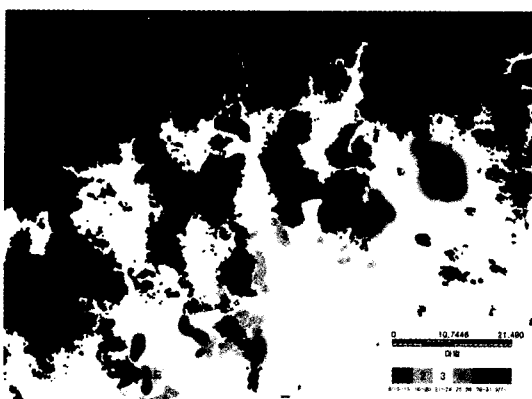


그림 19. 1999년 적조이동경로

상에 의해 해수의 탁도와 투명도를 정량적으로 평가함으로써 수질의 공간적인 구분화가 가능하다. 그리고 해수의 투명도는 수면에 유입되는 빛의 소광 정도와 관계되며 수면에 포함되는 구성성분이 흡광 영향에 상대적으로 클 경우 투명도는 낮게 되는 원리를 적용함으로써 해수의 투명도를 판단 할 수 있다.<sup>11)</sup>

본 연구지인 여수만 일대의 연안해역은 용존의 유기물의 농도가 높고 부유사에 의한 산란 특성이 크게 반영되는 해역이다. 이론에 의하면 부유사 농도가 증가하면 반사치는 증가하지만 탁도가 증가하여 투명도는 낮아지는 경향이 있다고 하였다.<sup>12)</sup> 그리고 channel 1을 활용한 과거 Li, j. and Li, Y(1991)의 중국 Hangzhou만에서 해저 퇴적물의 변동 조사의 사례와 서, 한, 강(1993)황해 남동부해역의 투명도 분포 추정에 활용했던 사례를 참조하여 본 연구지에 AVHRR 1channel(0.58~0.68  $\mu\text{m}$ )의 가시영역대의 자료를 활용하였다. 또한 연구지의 투명도를 정량적으로 해석하고자 여수인근의 해역에서 Transmissometer를 설치한 선박으로 연속적으로 측정값과 측정점에서 해수를 채취하여 Filtering한 후 무게측정에 의한 방법으로 해수의 탁도를 측정 후 조정 환산하였다.

### 2.6 해수의 염분분석

적조의 분석에서 해수중의 염분농도는 적조생물의 생육과 관련된 문제로서 중요한 자료가 된다. 일반적인 적조생물은 해수의 온도 15°C와 25°C에서는 고염분의 조건에서 생육조건이 좋아지며, 온도 25°C 이상의 조건에서는 반대로 저염분의 조건에서 적조생물의 생육상태가 좋아진다.<sup>13)</sup> 본 연구지의 염분농도는 연구지 일대에서 남해수산연구소에서 결정한 조사지점의 해수의 표층과 저층을 기준으로 샘플 채취하여 조사한 염분 값과 원해의 경우 조류의 이동과 수온, 색도 등을 실시간으로 위성에 송신할 수 있도록 제작된 위성추적용 표류부이(Drifter)에 의해 취득된 데이터를 인용하여 활용하였다.

## 3. 결 론

연안해역 적조발생예측기법을 연구함에 있어 원격탐측기법을 적용하고자 기존의 자료와 원격탐측자료를 활용하여 해석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, 연구지에서 취득한 현장자료를 분석한 결과 강

우량이 평년에 비해 높아 상대적으로 저염분상태였던 시기인 1998년에 적조발생빈도가 많았으며 또한 해수온도가 높았음을 알 수 있었다. 그리고 적조생물의 포식원으로 인해 인의 관측값이 낮았던 하절기에 적조가 활성화됨을 알았으며 인과 상반되는 결과로서 질소는 상대적으로 높은 값으로 관측되었다. 이는 적조생물의 포식후 배출되는 부산물의 원인으로 판단된다.

둘째, 일반적인 적조의 발생시기인 8월에 관측한 부유물질측정값이 최고값을 나타내며 또한 이때의 화학적산소요구량이 3.5 mg/l에서 3개월 전, 후의 화학적산소요구량이 일정값인 1.5 mg/l 정도로 낮아져 연 중 최소의 관측값임을 알 수 있었다. 이는 적조생물의 번식과정에서 화학적산소량의 역할을 가늠 수 있는 기준으로 판단되며 차 후 좀더 많은 연구를 필요로 하는 분야이다.

셋째, 기존 해류의 흐름과 이동경로를 기반으로 적조의 발생과 이동경로를 개략적으로 예측할 수 있었으며, 연구지의 강우량과 수온, 클로로필의 변화, 해류의 흐름 그리고 해수 중의 염분농도, 질소와 인의 변화, 화학적산소요구량 및 부유물질의 함유량 등이 적조의 발생과 관련이 있음을 알았으며, 또한 이들 자료를 분석함으로써 적조의 예측이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. 국립수산진흥원, "한국연안의 적조," 1997, pp. 1-9.

2. 정종철, "원격탐사를 이용한 연안해역과 시화호의 수질 평가기법", 서울대학교 대학원 박사학위논문, 1999, pp. 1-73.

3. 서영상 외, "NOAA위성자료에 의한 해수표면 수온분포와 *Cochlodinium Polykrioides* 적조발생의 상관성", 한국환경과학회지, 9(3), 2000, pp. 215-221.

4. 해양수산부, "적조피해대책연구", 1999, pp. 38-106.

5. 여수시, "제3회 여수통계연보", 2000, p.18.

6. 국립수산진흥원, "1997~1998 한국연안의 적조발생상황", 1999, pp. 23-47.

7. 경상대학교 출판부, "적조의 과학", 1999, pp. 222-289.

8. Tassan, S. and B. Sturm, "An algorithm for the retrieval of sediment content in turbid coastal waters from CZCS data", *Int. J. Remote Sens.*, 7(5), 1986, pp. 643-655.

9. Tassan, S., "Evaluation of the potential of the Thematic Mapper for marine application", *int. J. Remote Sens.*, 8(10), 1987, pp. 1455-1478.

10. 전형섭, "원격탐사데이터의 분류정확도 향상에 관한 연구", 전북대학교 대학원 박사 학위논문, 2001, pp. 12-16.

11. Preisendorfer, R. W, Secchi diskscience : Visulal optics of natural water, *Limnol. Oceanogr.*, 31(5), 1986, pp. 909-926.

12. Mausel, P. W., J. H. Everitt, D. E. Escobar, and D. J. King Airborne videography: current status and future perspectives, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58, 1992, pp. 1189-1195.