

SAR와 현장관측에 의한 황해 어청도 주변 해역에서의 내부파 특성

김태림 · 최현용
군산대학교 해양과학대학

The Characteristics of Internal Waves Observed by SAR and *in-situ* Measurement Data Near Ocheong-Do in the Yellow Sea

TAERIM KIM AND HYUN-YONG CHOI

Kunsan National University, College of Ocean Science & Technology, San 68, Miryong-dong,
Kunsan, Chonbuk 573-701, Korea

서해 중부 연안에서의 내부파 관측을 위하여 현장 관측과 인공위성의 SAR(Synthetic Aperture Radar) 센서를 이용한 관측을 함께 수행하였다. 2002년 5월 28일부터 30일까지 어청도 서쪽 10 km 해상에서 thermistor chain, RCM 및 ADCP 유속계를 계류하여 관측하였으며 주변해역에 대한 CTD 관측도 수행하였다. 또한 29일 오전 6시 53분 SAR 영상을 획득하였다. 현장관측 결과 계류 지점을 통과하는 여러 개의 내부파가 관측되었고 SAR 영상에서도 관측지점 주변에서 다수의 내부파 군의 공간적인 분포를 확인할 수 있었다. SAR 영상에서 관측된 내부파의 공간적인 특성과 현장 관측에서 계산된 시간적인 특성에 K-dv(Korteweg and de Vries)방정식을 적용하여 서해 중부 연안에서 발생한 내부파의 특성을 분석하였다. 이러한 내부파는 물리적으로, 군사적으로, 그리고 해양생물학적으로 매우 중요한 현상이며 서해의 중요한 여름철 특성으로 고려되어야 할 것이다.

Observations of internal waves in the southwest coastal waters of Korea have been made using a mooring measurement and satellite SAR together. From May 28 to May 30 in 2002, thermistor chains with RCM and ADCP mooring measurements were carried out at 10 km west of Ocheong-Do, together with a CTD field survey on the surrounding waters. Also, a SAR image was acquired on May 29 at 06:53. The data from the *in-situ* measurement show several internal wave packets passing through the mooring point and the SAR image reveals numbers of internal wave packets distributed around the point. Temporal and spatial characteristics of internal waves in the southwest coastal waters were analyzed using the data from mooring measurement, SAR image, and the K-dv equation. The internal waves are important phenomena in terms of physical oceanography and military as well as marine biology. They should be considered as one of important features in the southwest coastal waters in summer.

Key words: Internal Waves, SAR, Mooring Measurement, Thermocline Depth, K-dv Equation

서 론

여름철 성층화된 해양에서 발생하는 내부파는 큰 진폭으로 인하여 종종 선상에서 육안으로 식별되기도 하며 최근에는 위성사진을 통해서도 관측되고 있다. 이러한 내부파는 해양의 밀도 약층과 관련된 물리적인 특성으로 군사적으로 중요할 뿐만 아니라 여름철과 같이 성층화가 이루어졌을 때 수온 약층의 수직 이동을 통하여 저층의 영양물질을 상층으로 공급하는 중요한 역할을 한다. 특히 이러한 내부파가 얇은 연안에서 깨어지는 경우 전 수층으로의 영양염류의 이동을 가능하게 하는 생물학적으로도 매우 중요

한 현상이다. 위성에서 관측이 이루어지기 전까지의 내부파 관측은 주로 한 지점 혹은 2~3개 지점에서 복수의 유속계나 수온계를 계류하여 관측하였다. 이러한 고정 지점에서의 관측은 관측 지점을 통과하는 내부파의 주기와 진폭 등 시간적인 특성을 관측하기에는 용이하나 파장이나 내부파 군의 주 진행방향, 파의 형태나 파의 규모, 근원 등 공간적인 특성을 밝히는 데는 어려움이 있었으며 특히 서해와 같이 시간에 따른 조위의 변화가 크고 조류가 강한 연안에서는 현장 관측 자료만으로 내부파의 특성을 파악하는 데는 어려움이 있었다.

최근의 인공위성에 의한 원격탐사 자료의 해양학에서의 응용은 해양 관측에 있어서 획기적인 전기를 마련하였다. 선상관측이나 계류 관측을 통하여서는 시시각각으로 변하는 넓은 해양의 현상

*Corresponding author: trkim@kursan.ac.kr

에 대한 공간적인 분포를 동시에 관측할 수 없었으나 위성 자료를 이용함으로써 비록 표층에 국한되지만 넓은 해역을 동시에 관측할 수 있었다. 내부파에 대한 위성 관측도 그 동안 랜셋(Landsat) 등을 통하여 국한적으로 수행되었지만 SAR를 탑재한 위성이 발사됨으로서 본격적으로 이루어지게 되었다. 해양에서 SAR 영상을 통해서 얻을 수 있는 해수 표면 현상 중 파랑이외에 일반적으로 자주 그리고 가장 뚜렷하게 발견되는 것이 바로 내부파이다 (Apel *et al.*, 1976; Elachi *et al.*, 1976). Shuckman and Kasichke (1979)과 Apel(1981)도 SEASAT 위성에 탑재한 SAR가 해수 표층상에 나타나는 내부파도 잘 보여줄 수 있음을 제시하였다. 이후에 세계의 여러 해양에서 많은 내부파들이 SAR 영상을 통하여 관측됨으로서 해양에서의 내부파에 대한 공간적인 스케일과 특성에 대해 보다 정확한 인식을 하게 되었다. 지금까지 SAR를 통하여 관측된 대표적인 내부파는 대부분 그 공간적인 스케일이 매우 커서 Sulu Sea(Liu *et al.*, 1985)나 지브롤터 해협(Alpers and Violette, 1992)에서 관측되는 내부파의 경우 그 파장이 수 km에 달하고 파봉 자체의 길이도 수백 km에 이르는 경우가 많았다. 그러나 최근에 우리나라 연근해에서 관측되는 내부파는 대양의 내부파에 비해 그 규모가 작은 것으로 나타났다. Liu *et al.*(1998)은 동지나해 대만 동북해역과 해남도(Hainan Island) 동쪽에서 ERS-1 SAR로 관측된 내부파의 특성과 K-dv 비선형 모델을 수행하여 나타난 결과를 이용하여 비교 분석하였다. 김과 원(1999)은 1996년 여름철에 제주도 동북쪽에서 RADARSAT SAR를 이용하여 두 개의 내부파군을 관측하였는데 파장은 200 m에서 400 m 정도의 작은 내부파 군이었다. Hsu *et al.*(2000)은 SAR를 이용하여 중국해와 황해에서 내부파를 관측 연구하였는데 특히 우리나라 남서 연안에서 발달한 많은 내부파들 사이의 상호 작용을 수치모델을 이용하여 연구하였다. 김(2001)은 위성 영상을 이용하지는 않았지만 동해 연안 대륙붕에서 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) 및 thermistor chain 등 계류 관측과 물성 관측을 통하여 동해 연안에서의 해양 내부파의 특성을 살펴보았다.

본 연구에서는 ADCP 및 thermistor chain의 계류 관측 자료와 SAR 자료를 분석하여 서해중부 연안에서 발생하는 내부파의 특성을 분석하고자 한다.

관 측

2002년 5월 28일부터 30일까지 서해 남부의 어청도 주변해역에 대한 물성 관측을 실시하였으며 동시에 Fig. 1에 나타난 바와 같이 어청도 서쪽 10 km 해역의 근접한 두 지점에서 ADCP, thermistor chain과 RCM-9 도플러 유속계(Norway Aanderaa사 제작)를 계류하여 5월 28일부터 30일까지 수심에 따른 물성 변화 및 유속의 변화를 관측하였다. ADCP 관측은 수심 61 m 지점에서 2002년 5월 28일 12시 30분부터 5월 30일 14시 30분까지 수행되었는데 해저면에서 표층까지 수심 4 m 간격으로 매 2분마다 각 수심에서 수평 유속 U(+동/-서), V(+북/-남)과 수직 유속 W(+상/-하)를 관측하였다. Thermistor chain과 RCM-9 유속계는 같은 지점에 동시에 계류하여 5월 28일 13시 30분부터 5월 30일 16시 19분까지 관측하였다. 해저면으로부터 해저면상 40 m까지는 11개의 수온센서가 4m 간격으로 배열된 thermistor chain을 계류하여

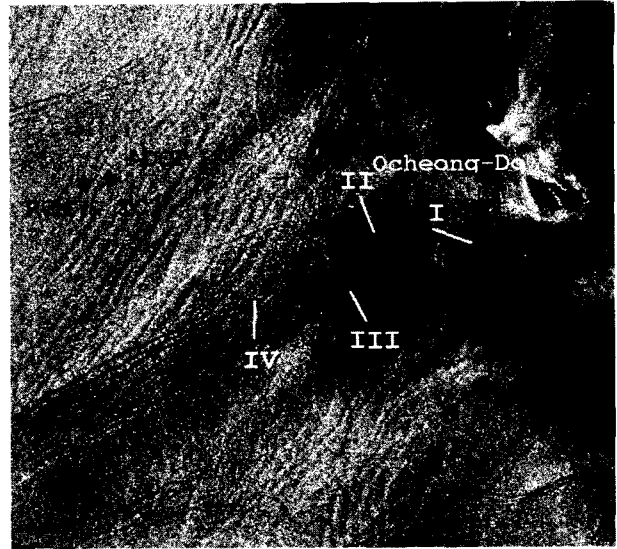


Fig. 1. RADARSAT SAR image obtained on May 29, 2002 near Ocheong-Do in the Yellow Sea and the location of mooring measurements.

1분 간격으로 수온을 관측하고 해저면 상 44 m(표층으로부터 약 15 m 깊이)에는 RCM-9 유속계를 설치하여 유속과 수온을 1분 간격으로 관측하였다. 또한 계류 관측기간 동안인 5월 29일 오전 6시 53분에는 RADARSAT SAR를 이용하여 계류 관측 지점의 부근 해역을 촬영하였다.

관측 지점의 수온 수직 구조

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 이격 거리가 약 1 km인 ADCP 계류 지점과 thermistor chain 계류지점에서 36분의 시간차를 두고 관측된 CTD 결과이다. 수심이 약 61 m인 ADCP 계류지점에서 약 30 m 깊이까지만 관측된 수온 수직 구조에 의하면 표층 하 약 10 m 정

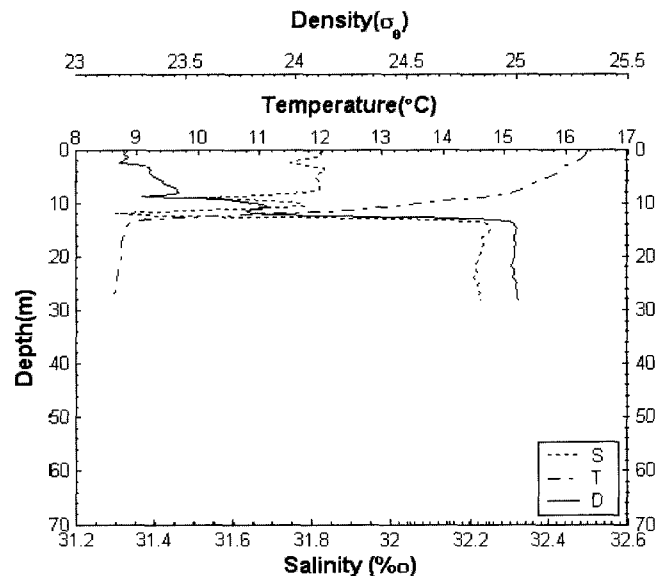


Fig. 2. Temperature, salinity, and density profiles at the ADCP mooring point on May 28, 2002 at 11:40.

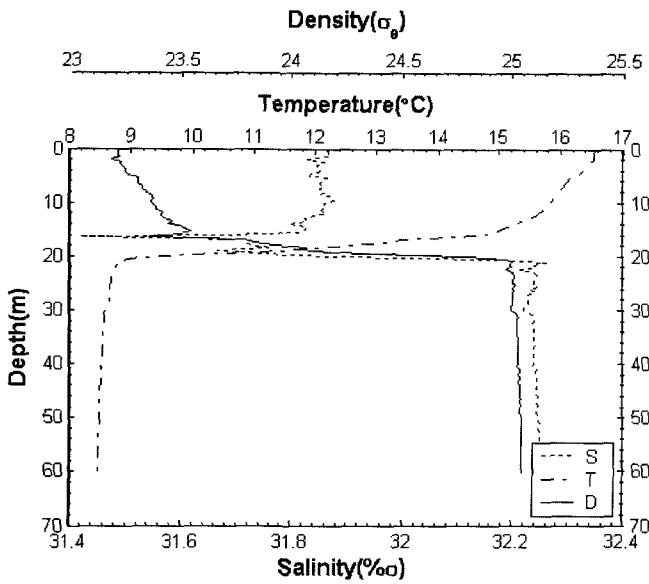


Fig. 3. Temperature, salinity, and density profiles at the thermistor chain mooring point on May 28, 2002 at 12:16.

도의 깊이에 수온 약층이 형성된 반면에 thermistor chain 계류지점에서는 표층 하 약 20 m 깊이에서 강한 수온 약층이 형성되어 두 지점간 수온 약층의 깊이가 약 10 m 정도의 차이를 보였다. 두 지점간의 거리가 약 1 km이고 관측 시간차가 36분으로 시공간적으로 큰 차이가 없음에도 불구하고 수온 약층의 깊이가 약 10 m 정도 차이가 나는 이러한 관측결과는 내부파와 같은 물리적 요인에 의해 수온 약층의 수직이동이 일어났을 가능성을 제시하는 결과로 해석된다. Choi *et al.*(1997)은 동일해역에서 1996년 8월 20일부터 21일까지 물성 관측을 하였는데 이때에도 등온선의 시간에 따른 수직이동이 관측되었으나 강한 조석과 현장 관측의 어려움 등으로 인하여 여러 가지 발생 가능성만을 제시하였을 뿐 내부파에 대한 확증을 갖기에는 어려움이 있었다. 그러나 본 연구에서는 계류 관측과 함께 SAR에 의한 관측을 동시에 함으로서 수온 약층의 시간에 따른 급격한 변화가 내부파에 의한 것이라는 확증을 가질 수 있게 되었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 어청도의 서쪽에서 나타나는 주름모양은 모두 내부파를 보여주고 있는 것으로 많은 수의 내부파 군이 동시에 전파되어 가고 있음을 알 수 있다. 또한 계류 관측에서도 수심에 따른 수온 및 유속 자료에서 내부파의 특성이 뚜렷하게 나타났다.

계류 관측 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 계류 관측 자료 중에서 내부파의 특성이 뚜렷이 나타나는 시간에 한하여 따로 나타낸 것이다. 각 그림에서 a)는 RCM-9 유속계에서 관측한 수온의 시계열, b)는 thermistor chain에서 관측한 수심별 수온을 이용하여 구성한 등온선 변화, c)는 ADCP에서 관측된 수직 속도 분포, 그리고 d)와 e)는 ADCP에서 관측한 깊이별 수평속도 중에서 가장 변화폭이 큰 수심에서의 시간에 따른 수평속도 분포를 U와 V 성분으로 나누어서 나타낸 것이다.

Fig. 4의 경우 5월 28일 14시부터 수온 및 유속에서 진폭이 작은 진동이 나타나기 시작하여 15시부터 17시 사이에 약 5개의 뚜

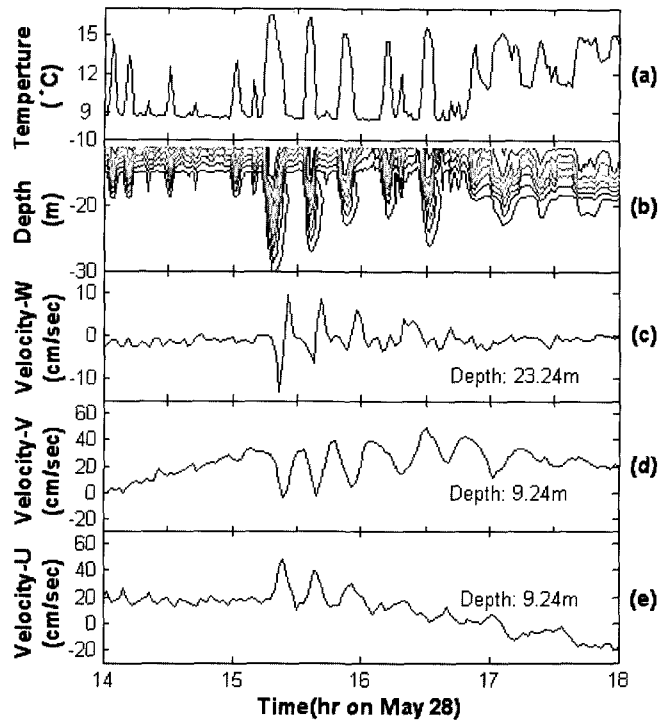


Fig. 4. Time series of temperature from RCM, isothermal depth from thermistor chain, and vertical and horizontal velocity from ADCP measurements of internal waves in the Yellow Sea on May 28, 2002.

렷한 내부파의 특성이 관측되었다. 수심 15 m에서 관측한 RCM 유속계에서 관측한 수온의 경우(Fig. 4a) 동일한 수심에서 약 18 분 간격으로 9°C에서 17°C까지 변화하였으며 thermistor chain에서 관측된 등온선의 시간변화(Fig. 4b)에 의하면 이러한 수온 변화는 30 m 깊이까지 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 이와 같은 등온선의 시간변동이 크게 나타나는 시간대에 유속 역시 뚜렷한 변화를 보이고 있으며, 그 변화폭은 수직속도의 경우 최대 약 20 cm/sec, 수평속도의 경우 최대 약 40 cm/sec로 나타났다(Fig. 4c, d, e).

Fig. 5의 경우 5월 29일 14시부터 수온 및 유속에서 진폭이 작은 진동이 나타나기 시작하여 15시부터 17시 사이에 약 6개의 뚜렷한 내부파의 특성이 관측되었다. 수심 15 m에서 관측한 RCM 유속계에서 관측한 수온의 경우(Fig. 5a) 동일한 수심에서 약 19 분 간격으로 9°C에서 15°C까지 변화하였으며 thermistor chain에서 관측된 등온선의 시간 변화(Fig. 5b)에 의하면 이러한 수온 변화는 25 m 깊이까지 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 이와 같은 등온선의 시간변동이 크게 나타나는 시간대에 유속 역시 뚜렷한 변화를 보이고 있으며, 그 변화폭은 수직속도의 경우 최대 약 10 cm/sec, 수평속도의 경우 최대 약 20 cm/sec로 나타났다(Fig. 5c, d, e). 28일 관측된 내부파와 비교하여 볼 때 주기는 1분 정도 길지만 변화폭은 상대적으로 작은 내부파로 추정된다. 두 개의 내부파군에 나타난 내부파들의 평균 주기를 계산하여 보면 18.8분이 다. 특기할 만한 사항은 두 경우 모두 간조에서 고조로 이동하는 중간 시점에서 관측되었다는 것으로 이는 동일한 근원에서 생성되는 것으로 추정할 수 있으나 이에 대해서는 자료 및 내부파 이론에 대한 더 많은 연구와 분석을 필요로 한다. 이외에도 Fig. 4

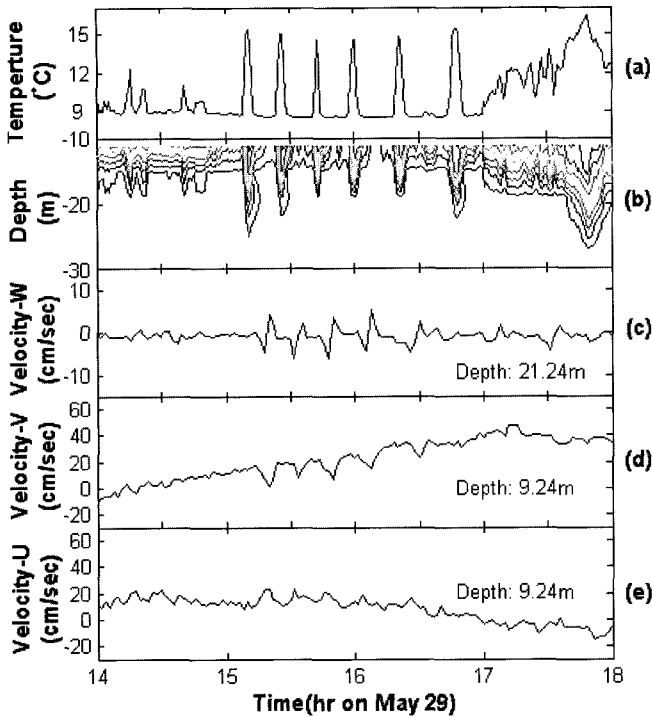


Fig. 5. Time series of temperature from RCM, isothermal depth from thermistor chain, and vertical and horizontal velocity from ADCP measurements of internal waves in the Yellow Sea on May 29, 2002.

와 Fig. 5와 같이 뚜렷하지는 않지만 다수의 내부파군이 ADCP 및 thermistor chain 계류 기간동안 관측되었다.

SAR 관측

5월 29일 오전 6시 53분에는 RADARSAT SAR 영상을 획득하였다. RADARSAT SAR는 C밴드(5.3 GHz)에서 수평 편광(HH polarization)으로 촬영하게 되는데 본 영상은 Descending 모드에서 extended low beam으로 촬영한 것으로 입사각은 16.8° 이고 영상의 길이는 182.9 km, 너비는 165.2 km 이며 각 화소의 거리는 10 m이다. 앞에서 보인 Fig. 1은 획득한 영상을 해도를 이용하여 기하 보정을 한 후 어청도 및 계류 관측 해역 부분을 절단하여 표시 한 것이다. 영상에서 나타난 바와 같이 많은 주름이 나타나는데 이는 모두 해수 표면의 거칠기의 차이가 위성으로부터의 레이더를 각기 다르게 후방 산란(back scattering)시킴으로서 그 강도의 차이로 인하여 영상으로 나타난 것이다. 많은 주름 모양 중에서 김과 원(1999)이 언급한 SAR 영상에 나타난 내부파의 특징을 기초로 하여 계류 관측 해역 부근에서 뚜렷하게 나타난 네 개의 내부파 군을 선택하여 분석하였다.

Fig. 6은 Fig. 4 및 5와 마찬가지로 29일 오전 3시부터 7시까지 계류 관측한 결과를 나타낸 것이다. 앞의 두 경우처럼 수심에 따른 수온 변화 및 유속 변화에서 뚜렷하지는 않지만 역시 내부파가 관측되고 있음을 알 수 있다. 그래프의 x축에 화살표로 SAR라고 표시한 부분은 SAR 관측이 이루어진 시간을 나타내는데 내부파가 통과한 후임을 알 수 있다. 내부파가 나타난 관측 시간에 SAR 영상을 획득하였다면 현장 관측지점이 내부파군의 사이에 위

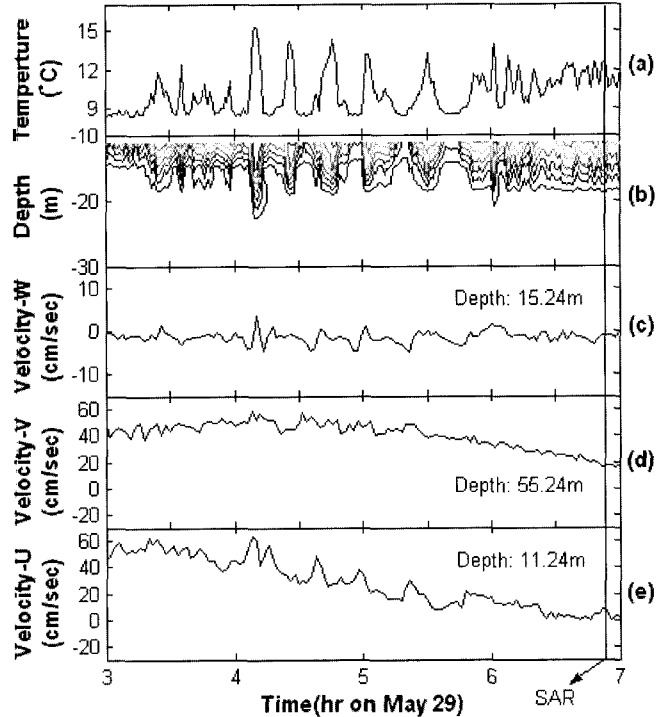


Fig. 6. Time series of temperature from RCM, isothermal depth from thermistor chain, and vertical and horizontal velocity from ADCP measurements of internal waves in the Yellow Sea on May 29, 2002.

치하게 됨으로서 동일한 내부파 군에 대한 시간 및 공간적인 분석이 가능하나 현 연구에서는 그와 같은 동일한 내부파에 대한 현장 관측과 위성 관측이 동시에 이루어지지지는 못하였다. 이는 서해 연안에서의 내부파 발생에 대한 원인과 시기에 대한 정확한 정보가 아직 연구되어지지 않았고 또한 위성 영상의 획득이 위성이 궤도 순환 중에 우리나라 상공에 위치하였을 때만 가능하다는 한계로 인한 것이다. 그러나 앞으로는 더 많은 인공위성의 활용과 서해 연안의 내부파 특성 연구의 진척에 따라 이러한 한계는 극복되어 질 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 29일 오전 6시 53분 즉 Fig. 4에 관측된 내부파와 Fig. 5에 관측된 내부파 사이에 관측된 SAR 영상 중 현장관측 부근에 출현한 내부파 군들에 대한 정성적인 서술과 함께 그 평균값을 통하여 내부파의 공간적인 특성에 대한 정량적인 특성을 제시하고자 한다.

SAR 영상에서 나타나는 내부파들은 4개 내지는 10개의 파봉으로 그룹 혹은 묶음(packets)의 형태로 발견되며 점이나 근원해역으로부터 방사형태로 전파되어 가는 형태를 보인다. Fig. 1에서도 앞에서 언급한 형태와 유사한 내부파들이 여러개 나타나는 것을 알 수 있다. 그 대체적인 경향은 방사 형태의 블록한 부분이 주로 북북서 혹은 북서쪽을 향하는 것으로 보아 그 방향으로 전파되어 가는 내부파라는 것을 추정할 수 있다. 그러나 여러개의 내부파군들이 복잡하게 나타나기 때문에 그 근원을 분석하기 위해서는 더 많은 관측과 연구가 필요할 것으로 보인다. 특히 명확하게 나타나는 않지만 서로 다른 방향으로 진행하는 내부파 군들이 서로 교차하여 상호작용을 일으키는 것도 관측되고 있다.

Fig. 1 영상에 나타난 여러 내부파군들 중 뚜렷하게 나타난 네 개의 내부파군을 선택하여 영상에 I, II, III, IV으로 표시한 후 가

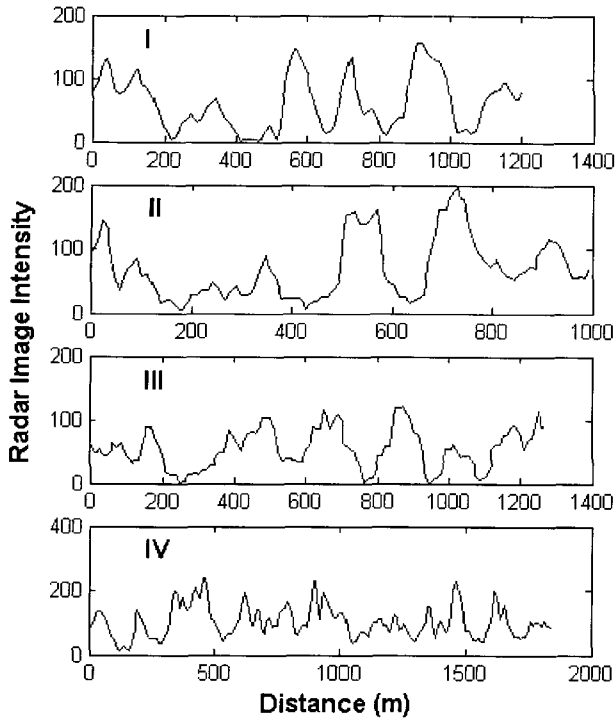


Fig. 7. SAR intensity along the cross section cuts indicated by the lines I, II, III, and IV in Fig. 1.

장 먼저 진행하는 파봉선들에 대한 수직한 선을 나타내었다. II, III, IV의 경우 북 혹은 북북서로 진행하는 내부파 군들이며 I의 경우는 북서쪽으로 진행하는 내부파 군이다. 앞서 언급한 대로 동시에 같은 해역에서 여러개의 내부파 군으로 출현한 것으로 보아서 내부파 생성에 대한 근원도 다수일 것으로 추정되며 각각의 근원에 대한 정확한 결론을 내리기는 어렵다.

Fig. 7은 내부파군들의 파봉선에 수직한 선을 따라서 나타난 레이다 영상의 강도를 거리에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 강도가 낮게 나타난 부분이 영상에서 내부파군의 어두운 띠로서 나타나게 된다. 각각의 내부파군의 어두운 띠 사이의 평균 거리를 계산하여 보면 I의 경우 192.1 m, II의 경우 224.1 m III의 경우 193.7 m IV의 경우 240.5 m로서 전체 평균 거리는 212.6 m 이다. 이러한 내부파 군에 있어서의 내부파의 진행 방향 및 파장에 대한 정보는 현장의 계류 관측정보 만으로는 계산해 내기 어려운 정보이다. 다음에는 이러한 내부파에 대한 공간 정보와 현장관측에서 얻은 시간 정보를 솔리톤 이론에 적용하여 보고자 한다.

Soliton 이론 적용

내부파와 관련하여 많은 역학적인 설명들이 이루어 졌으며 (Neuman and Pierson, 1966; Leblond and Mysak, 1978), Osborne

and Burch(1980)는 soliton 이론과 그들의 관측 결과를 비교하였다. 내부파가 발생하여 전파되는 경계면의 밀도는 해표면에 비해 구배가 매우 적기 때문에 큰 진폭을 갖는 파를 발생시키고 또한 그 파를 유지하는데 있어서 많은 에너지를 필요로 하지 않는다. 이러한 내부파들은 해수 표층에 영향을 줄 정도의 큰 진폭을 갖는데 이러한 현상은 비선형이론으로 설명되어지며(Apel *et al.*, 1980; Holbrook *et al.*, 1980; Kubota *et al.*, 1978) Korteweg de Vries 식을 통하여 그 현상에 근접한 해를 구할 수 있다. 그리고 그 해는 단독파(solitary wave) 혹은 일련의 내부 솔리톤(a train of internal solitons)으로 나타난다(Osborne and Burch, 1980). 두 층으로 이루어진 매체를 가정하고 상층부와 하층부의 깊이와 밀도를 각각 h_1, ρ_1 그리고 h_2, ρ_2 라고 할 때 단독파에 대한 K-dV 식은 다음과 같다.

$$\zeta_x + c_0 \zeta_x + \alpha \zeta \zeta_x + \gamma \zeta_{xxx} = 0 \tag{1}$$

$$c_0 = \left(\frac{g(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2} \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

$$\alpha = -\frac{3c_0}{2} \left[\frac{h_2 - h_1}{h_1 h_2} \right] \tag{3}$$

$$\gamma = \frac{c_0 h_1 h_2}{6} \tag{4}$$

그 해는

$$\zeta(x, t) = \zeta_0 \operatorname{sech}^2 \left[\frac{(x - ct)}{L} \right] \tag{5}$$

이 때 솔리톤의 속도와 진폭 크기는 각각

$$c = c_0 \left[1 + \frac{2h_1 h_2}{3L^2} \right] \tag{6}$$

$$\zeta_0 = \frac{4h_1^2 h_2^2}{3L^2 (h_2 - h_1)} \tag{7}$$

와 같다.

Table 1은 윗 식을 근거로 하여 수온 약층의 수심이 10 m인 Fig. 2의 경우와 수온 약층의 수심이 20 m인 Fig. 3의 경우에 각각의 수심에 대하여 밀도 값을 대입하여 식 (1)에 사용된 계수를 구한 것이다. 식에 사용된 길이 규모 L은 sech^2 형태의 단독파를 고려하여 최고 진폭의 10%에 해당하는 지점 사이의 너비를 이용하게 된다. 따라서 영상에서 관측한 파장을 λ 라고 할 때 $\lambda = 3.6 L$ 을 사용하였다(Holloway, 1987). 즉 관측된 평균 파장의 길이가 212.6 m 이므로 $L = 59.1$ m이다. 계산된 결과에 의하면 진폭의 경우 Fig. 2의 지점에서는 2.2 m이고 Fig. 3의 지점에서는 12.2 m 로 나타났으며 파속은 각각 0.4 m/sec과 0.5 m/sec이다. 파속과 파장과의 관계식을 이용하여 계산한 주기는 각각 9.7분과 7.1분이다. 주기의 경우 계류 관측에서 구한 평균 주기인 18.8분과는 2배 정

Table 1. Parameters for the two layer soliton model.

Case	h_1 (m)	h_2 (m)	ρ_1 (kg/m ³)	ρ_2 (kg/m ³)	c_0 (cm/sec)	α	γ	ζ_0 (m)	c (cm/sec)	T (min)
Fig. 2	10	44.2	1023.37	1024.83	33.74	-0.0392	24.8568	2.18	36.59	9.68
Fig. 3	20	39.1	1023.54	1025.02	43.27	-0.0159	56.3953	12.24	49.74	7.12

도의 차이를 보이며 일치하지 않고 있다. 이에 대한 가장 큰 이유는 하나의 동일한 내부파군에 대한 시간적 공간적 분석을 하지 않고 각각의 관측에서 계산된 평균값을 이용하고 있다는 데 있다고 볼 수 있다. 두 번째 이유로 위의 계산식은 두 번째 차수에 의한 비선형항을 완전히 무시한 데 있다. 실제로 Sandstrom and Elliott (1984)의 경우에도 계산된 주기값과 관측된 주기값이 일치하지 않음을 언급한 바가 있으며 Holloway(1987)의 경우에도 Gear and Grimshaw(1983)가 계산한 2차 교정을 한 후 파속이 줄고 주기가 2배 정도로 증가하여 관측치와 근접함을 보인 바가 있다. 본 연구에서도 관측된 주기가 계산된 주기에 비하여 2배정도 크게 나타났다. 비선형항에 대한 자세한 계산은 추후에 현장과 위성의 동시 관측 자료를 더 많이 획득한 후에 하기로 한다.

결론 및 제언

본 연구에서는 서해 남서연안인 어청도 서쪽 10 km 지점에서 수행한 계류 관측과 부근 해역에 대한 SAR 영상을 통하여 관측된 내부파들에 대한 분석을 하였다. 분석 결과 평균 주기 약 18.8 분 그리고 평균 파장 약 212.6 m의 소규모의 내부파 군이 여름철 성층화된 서해 연안에 다수 분포하는 것으로 보인다. 이러한 내부파는 영양염류의 이동이나 어군들의 분포 등 해양 생물학적으로 중요할 뿐만 아니라 수온 약층을 경계로 움직이는 파라는 점에서 해양물리학적 측면과 잠수함작전 등 군사적으로도 매우 중요한 현상이다. 또한 내부파의 존재를 제시한 본 연구 결과는 여름철 서해의 물리적인 환경이 수평적인 변동 외에 수직적인 변동 역시 크게 일어날 수 있는 환경임을 의미한다. 따라서 여름철 서해연안에서 발생하는 많은 수의 소규모 내부파군은 여름철에 서해역에서 나타나는 중요한 해양현상의 하나로 고려되어야 하며 이에 대한 더 많은 연구가 필요할 것이다. 이를 위해서는 동시에 다수의 계류 관측과 함께 다수의 SAR 영상을 활용하여야 할 것이며 이를 통하여 서해연안에서 발생하는 내부파에 대한 더 자세한 분석과 근원에 대한 연구가 가능하여 질 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 군산대학교 새만금 환경 연구센터의 일부 지원으로 수행되었으며 위성자료는 한국해양연구원으로부터 제공받았습니다. 이에 감사드립니다. 또한 자세한 교정을 해주신 심사위원 분들께도 감사드립니다.

참고문헌

김태림, 원중선, 1999. SAR를 이용한 제주도 북부 해역에서의 내부파 관측예. 'The Sea', *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **4**(1): 18-24.
 김형록, 2001. 동해 연안에서의 내부파에 관한 연구, 서울대학교 대학원 이학 박사학위 논문, 97 pp.
 Alpers, A. and P.E. La Violette, 1992. Tide generated nonlinear internal wave packets in the strait of Gibraltar observed by the synthetic aperture radar aboard the ERS-1 satellite. In: Proceedings

first ERS-1 Symposium-Space at the service of our environment, 753-758 pp.
 Apel, J.R. and J.R. Holbrook, 1980. The Sulu Sea internal soliton experiment, Part A: Background and overview. *EOS*, **61**(1009).
 Apel, J.R., J.R. Proni, H.M. Byrne and R.L. Sellers, 1976. A study of oceanic internal waves using satellite imagery and ship data. *Remote Sens. Environ.*, **5**: 125-135.
 Apel, J.R., 1981. Nonlinear features of internal waves as derived from the Seasat imaging radar. In: *Oceanography from space*, edited by Gower, J. F. R., Plenum Press, New York and London, 525-533 pp.
 Choi, H.Y., S.H. Lee and J.H. Lee, 1997. Isotherms oscillation in stratified coastal ocean off central western coast of Korea. *The Yellow Sea*, **3**: 52-57.
 Elachi, C. and J.R. Apel, 1976. Internal wave observations made with an airborne synthetic aperture imaging radar. *Geophys. Res. Lett.* **3**: 647-650.
 Gear, J.A. and R. Grimshaw, 1983. A second-order theory for solitary waves in shallow fluids. *Phys. Fluids*, **26**: 14-29.
 Holbrook, J.R., J.R. Apel and J.J. Tsai, 1980. The Sulu Sea internal soliton experiment, Part B: Observations of large amplitude nonlinear waves. *EOS* **61**(1009).
 Holloway, P.E., 1987. Internal hydraulic jumps and solitons at a shelf break region on the Australian North West Shelf. *J. Geophys. Res.*, **92**(C4): 5405-5416.
 Hsu, M. K., A.K. Liu and C. Liu, 2000. A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR. *Cont. Shelf Res.*, **20**: 389-410.
 Kubota, T.K., D.R.S., and L. Dobbs, 1978. Propagation of weakly nonlinear internal waves in a stratified fluid of finite depth. *J. Hydronaut.* **12**: 157-168.
 Le Blond, P.A. and L.A. Mysak, 1978. *Waves in the ocean*. Elsevier. 602 pp.
 Liu, A.K., Y.S. Chang, M.K. Hsu and N.K. Liang, 1998. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas. *J. Geophys. Res.*, **103**(C4): 7995-8008.
 Liu, A.K., Holbrook, J.R., and Apel, J.R., 1985. Nonlinear internal wave evolution in the Sulu Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**: 1613-1624.
 Neuman, G. and W.I. Pierson, 1966. *Principles of Physical Oceanography*. Prentice-Hall, 545 pp.
 Osborne, A.R. and T.L. Burch, 1980. Internal solitons in the Andaman Sea. *Science*, **208**: 451-460.
 Sandstrom, H., and J. A. Elliott, 1984. Internal tide and solitons on the Scotian Shelf: A nutrient pump at work. *J. Geophys. Res.*, **89**: 6415-6426.
 Shuckman, R. A. and E. Kasischke, 1979. The detection of oceanic bottom topographic features using SEASAT synthetic aperture radar imagery. In: *SEASAT SAR Coastal Ocean Wave Analysis*. Rep. 136800-2-F, ERIM., Ann Arbor, Michigan.

2003년 3월 13일 원고접수

2003년 5월 6일 수정본채택

담당편집위원: 이상호