Korean Journal of Remote Sensing, Vol.25, No.2, 2009, pp.155~163

시계열 등온선 자료에서의 SAR로 관측된 내부파의 추적 연구

김 태 림†

군산대학교 해양과학대학

Tracking of Internal Waves Observed by SAR in the Time Series of Temperature Profile Data

Taerim Kim †

College of Ocean Science & Technology, Kunsan University

Abstract : An abundance of internal waves is observed by SAR in the Yellow Sea during summer. They are small scaled internal waves and are not relatively studied well compared to the ones in the East/South China Sea. These internal waves should be considered in the study of physio-biological properties of the Yellow Sea because the mixing of the stratified surface water caused by internal waves during summer is important for ocean biological environment, and they also affect the sediment transport and acoustic signal transmission in the continental shelf region. To understand the characteristics of internal waves, it is important to get the spatio-temporal information of internal waves simultaneously by executing in-situ measurements as well as the SAR observation. This study tracks the internal waves observed by SAR in the time series of temperature profile data by analyzing simultaneously acquired in-situ measurement data and RADARSAT SAR image on 29 May 2002.

Key Words : internal wave, SAR, the Yellow Sea, temperature profile, spatio-temporal information.

요약 : 여름철 우리나라 서해 연안을 관측한 SAR영상에서 다수의 내부파가 관측되고 있으며 이들은 동지나해에서 관측되는 내부파들에 비하여 소규모이며 상대적으로 많은 연구가 이루어지지 않고 있다. 이러한 내부파들은 여름철 표층 해수의 혼합을 발생시킴으로서 해양 생물학적으로 중요한 역할을 하며 대륙붕에서의 퇴적물 이동 및 음파의 전달에 있어서도 중요한 요소로서 서해의 물성 특성 연구에 있어서 반드시 고려되어야 한다. 내부파의 특성 분석을 위해서는 시공간적인 정보가 필요하며 이를 위해서는 현장 관측과 위성 관측이 동시에 이루어져야 한다. 본 연구에서는 2002년 5월 29일 현장 관측과 동시에 획득된 SAR영상을 분석하고 영상에 나타난 내부파와 동일한 내부파를 시간에 따른 수심별 등온선의 변화에서 분석 · 추적하였다.

접수일(2009년 4월 13일), 수정일(1차 : 2009년 4월 23일), 게재확정일(2009년 4월 23일).

† 교신저자: 김태림(trkim@kunsan.ac.kr)

1. 서 론

SAR 탑재 위성의 증가와 SAR 영상의 획득이 용이해짐에 따라 여름철에 우리나라 주변해역을 촬영한 SAR 영상에서 많은 내부파가 관측되고 있다. 이러한 내부파는 성층화된 여름철 해양에서 밀도 경계부에 충격이 가해질 때 발생하며 해수 표면파에 비하여 진폭이 매우 크며 전파 속도는 상당히 느리다. 내부파는 영양분이 풍부한 저층의 해수가 표층으로의 이동이 제한되는 여름철의 성층화된 해역에서 큰 진폭의 파동 운동을 통하여 해양 상층부의 수직간 혼합에 일조를 하고 식물 플랑크톤과 같이 유영 능력이 없는 생물들의 수직간 혼합을 발생시킨다. 이에따라 식물 플랑크톤의 성장에 큰 영향을 주며 이는 바로 동물 플랑크톤의 분포와 이를 먹이로 하는 어류들의 성장에 직접적으로 영향을 끼치게 된다 (Holligan *et al.*, 1985). 또한 내부파는 그 입자 운동을 통하여 대륙붕 해역에서의 흐름, 쇄파 그리고 퇴적물 이동을 발생시키면서 지역적인 혼합에 큰 영향을 끼치므로 대륙붕 해역의 해양 역학적인 측면에서 매우 중요한 역할을 하고 있는 것으로 알려져 있으며 세계 대양에 있어서도 혼합(mixing) 역할과 심해의 용승이나 대규모의 열염분 순환에도 기여를 한다고 연구되고 있다(Munk and Wunch, 1988). 특히 그 에너지가 큰 경우 외해에 위치한 해양 유전과 같은 구조물의 안전도에도 영향을 준다. 잠수함 작전과 같은 해군 작전에 있어서도 해양에서의 음파의 전달 특성에 대하여 파악하는 것은 매우 중요하며 음파의 반사가 발생하는 밀도 경계층에 대한 정보는 필수 요소이다. 그러나 내부파의 경우 이러한 밀도 경계층이 상하로 파동운동을 하는 것이므로 이에 대한 정보가 없으면 해양에서 음파를 이용하여 정확한 정보를 획득할 수 없다.

SAR 영상은 내부파가 전파되는 어느 한순간을 포착하여 촬영한 영상이지만 장비가 설치된 특정 지점만을 관측하는 현장관측에 비하여 2차원의 광범위한 해역을 관측할 수 있다. 그러나 내부파 특성에 대한 정확한 분석을 위해서는 현장 관측을 동반하여 시공간적인 특성에 대한 자료를 확보 하여야 하며 이를 통하여 향후에는 SAR 영상만으로도 내부파에 대한 보다 자세한 분석이 가능할 것이다.

우리나라의 인근해역인 동남지나 해역의 경우 대규모의 내부파가 뚜렷하게 관측되고 있고 이의 특성과 원인을 분석하기 위하여 국제적인 공동연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한 그 연구를 확대하여 우리나라 서해역에 대한 연구도 하고 있다. 본 연구에서는 우리나라 서해 인근 해역에서 동일한 시기에 이루어진 내부파 현장 관측 자료와 SAR 관측 영상을 통하여 SAR영상에 관측된 내부파와 동일한 내부파를 현장 관측 자료에서 추적 확인함으로서 시공간적인 특성을 분석하여 본다.

2. 우리나라 서해 인근 해역에서의 내부파 연구

여름철 우리나라 해역을 촬영한 SAR 영상을 분석하면 모든 해역에서 내부파가 빈번히 관측되고 있으며 특히 서해 연안의 경우 전체 해역이 마치 사람의 손금과 같이 상당히 많은 내부파가 분포하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 1은 2002년 5월 29일 서해 연안을 촬영한 RADARSAT SAR 영상으로서 많은 수의 내부파들이 산재해 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 2는 해저 수심과 함께 Fig. 1의 영상에서 뚜렷하게 나타나는 내부파들을 표시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 많은 내부파가 다양한 크기를 갖고 다양한 방향으로 전파해 가는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 다량의 내부파의 분포는 여름철 서해안의 경우 내부파가 해양의 역학적인 현상뿐 만 아니라 해양 생물학적 측면에서도 중요한 역할을 하고 있음을 의미한다. 따라서 서해의 해양 특성을 파악하기 위해서는 서해에 존재하는 내부파의 연구와 분석이 필수적이다. 이러한 내부파는 우리나라 인근 해역인 동지나해, 동중국해, 황해 그리고 발해만과 같은 중국 연근해에서 수없이 관측되고 있다(Hsu *et al.*, 2000; Zhao *et al.*, 2004; Teixeira *et al.*, 2006). 이 중에서 남중국해에서의 내부파는 이 해역의 대표적인 해양 현상으로 분류되어 최근에 매우 많은 연구가 이루어지고 있으며 그 중에는 파고가 140 m에 이르는 것도 관측되고 있다 (Ramp *et al.*, 2004). 또한 동지나해의 대륙붕단에서 Yang *et al.* (2004)은 내부파의 진폭이 10-20 m인 것을 관측하였고 큰 경우 35 m에 이른다고 하였다.

우리나라 서해 연안뿐만 아니라 전 세계의 성층화된 해양에서 SAR 영상을 통하여 관측되고 있는 내부파는

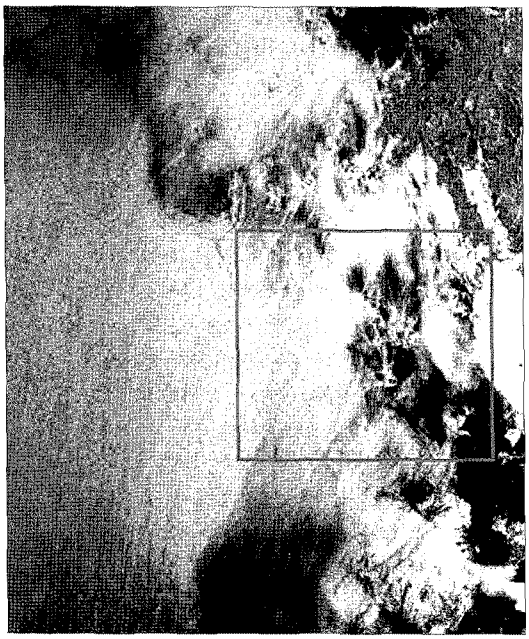

Fig. 1. An rectified image of RADARSAT SAR showing internal waves. The internal waves in the red rectangle are used for analysis.

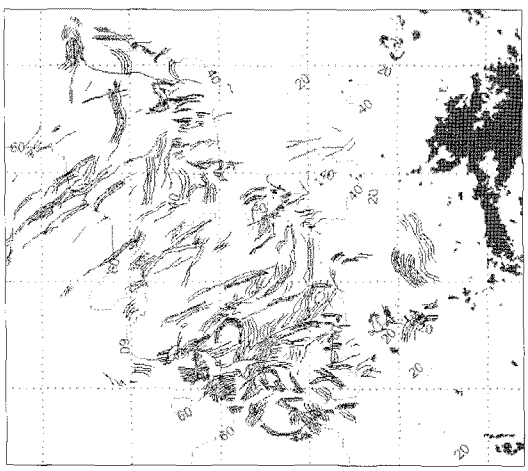

Fig. 2. Internal waves shown on RADARSAT SAR image (Fig. 1) and bathymetry.

대륙붕과 붕단 해역에서 특히 많이 발견 되고 있다. 대륙붕 해역에서 나타나는 내부파들은 조석과 해저 지형간의 상호 작용에 의하여 발생하는데 그 발생 기작은 해양의 환경에 따라 크게 두 가지로 접근하고 있다. 그 중 하나는 lee-wave 기작(Apel *et al.*, 1985; Lamb, 1994)으로서 썰물에 의하여 생성된 lee-wave가 조류가 썰물에서 밀물로 바뀔 때 방출되어 일정한 크기 순서로 된 파군을 형성 하면서 전파된다는 것이다. 다른 하나는 비선형 내부 조석에 의한 기작으로서 내부 조석이 지형의 장애로 인하여 초기에 전선(front)을 형성하며 이 전선이 비선형 효과로 인하여 가파른 형태를 갖게 되고 비선형 및 분산 효과에 의하여 일정한 크기 순서로 된 파군을 형성한다는 것이다(Gerkema and Zimmerman, 1995; Holloway *et al.*, 1997). 그러나 정확한 원인에 대해서는 더 많은 연구가 필요하며 각 해역의 특성으로 인한 영향이 클 것으로 보인다. 서해 외해역에서 발생하는 내부파의 경우 Zhao *et al.*(2004)는 남지나해에서 내부파가 관측된 SAR영상을 분석하여 이해역의 내부파가 Luzon 해협에서의 조석과 해저 지형간의 상호 작용으로 발생한 baroclinic 조석의 비선형 급경사로 인하여 생성되었음을 보여주었고 이러한 연구를 통하여 향후 내부파의 발전과정에 대한 현장 관측 계획을 수립하는데 있어서 기여하고자 하였다. Zhao and Alford(2006)은 남지나해의 북동쪽에서 관측되는 내부파는 lee-wave 라기 보다는 내부조석의 비선형 효과에 의하여 발생할 가능성이 높다고 제안하였다. 이 해역에서의 활발한 연구에 비해서 다른 해역에서의 내부파는 비록 위성 자료에서는 많은 내부파가 관측되고 있지만 상대적으로 많은 연구가 이루어지고 있지 않고 있다(Hsu *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2006).

비록 그 규모는 대양의 내부파에 비해 작지만 동남지나에서 이루어지던 내부파 연구가 점차 동지나해의 북쪽과 우리나라 연근해에 분포하는 소규모의 내부파 연구로 최근 확대 되고 있다. Hsu *et al.*(2000)은 SAR를 이용하여 중국해와 서해에서 내부파를 관측하여 분석하였으며 우리나라 남서 연안에서 발달한 많은 내부파들 사이의 상호 작용을 수치모델을 이용하여 연구하였다. 이들은 장기간 축적된 영상자료를 분석하여 쿠로시로 해류가 대륙붕으로 침입하여 발생한 용승 현상으로 인한 내부파의 발생과 내부파가 한계수심을 통과함에 따른 elevation 내부파의 발전, 해저 지형으로 인한 내부파의 천수 효과, 내부파 간의 간섭 효과 등을 분석하였다. 또한 Lee *et al.*(2006)은 동지나해 북쪽에서 약 3시간 동안 관측된 내부파를 분석하였다. 이를 통하여 인근 해역에서의 조류와 해저 지형간의 상호 작용에 의하여 내부파가 발생된다는 가설에 의문을 제기 하였으며 관측 장소로부터 남동쪽 200 km 떨어진 해양 대륙 붕단

에서 발생하여 전파 되어 왔을 가능성을 제시하였다. 김과 원(1999)은 여름철에 제주도 동북쪽에서 관측된 두 개의 내부파군을 분석 하였으며 김과 최(2003)는 서해의 어청도 주변해역에서 초음파 유속 분포 측정기(ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler)와 서미스터 체인(thermistor chain)을 이용한 계류관측을 통하여 많은 내부파를 관측하였다. 또한 계류기간 동안 획득한 SAR 영상에서도 다수의 내부파가 관측되어 두 관측 자료를 활용하여 내부파에 대한 시공간적인 분석을 시도하였다. Li *et al.*(2008)은 동지나해에서 관측된 SAR영상의 분석을 통하여 동지나해에서의 내부파의 진폭과 파장은 남지나해에서 관측된 것 보다 훨씬 작으며 전파 속도도 한 오더 정도 작게 나타나고 내부파 군도 공간적으로 일관성이 없으며 이는 한 곳 이상의 여러 곳에서 내부파가 발생되었다는 것을 의미한다고 하였다. 즉 동지나해에서 관측된 내부파 군의 간격과 조석 주기를 기초로 계산한 내부파의 전파 속도는 0.2-0.3 m/s로 나왔으나 이는 Hsu and Liu(2000)가 남지나해에서 관측한 내부파의 속도인 1.9 m/s에 비하여 한 오더 정도 작게 나타났다. 아직 이 해역에서의 내부파들의 생성원인과 전파 과정을 이해하기 위해서는 많은 연구가 필요하며 정량적인 분석을 위해서는 현장 관측과의 병행연구가 진행되어야 한다.

3. 내부파의 시공간적 분석의 필요성

내부파의 특성 분석을 위해서는 시공간적인 내부파의 정보가 필요하다. 즉 내부파의 파장과 전파 방향 그리고 분포도와 같은 공간적인 정보와 내부파의 주기, 전파 속도 그리고 진폭과 같은 시간적인 정보가 필요하다. 공간적인 정보의 경우 SAR 영상을 통하여 분석이 가능하며 내부파에 대한 시간적인 정보를 획득하기 위해서는 현장 관측을 실시하여야 한다.

SAR 영상이나 혹은 연속적으로 촬영된 SAR 영상으로부터 결정할 수 있는 내부파 특성 변수들로는 두 파봉간의 거리인 파장, 파봉의 길이, 파군 안에 포함된 솔리톤(soliton)의 개수, 두 파군간의 거리, 전파 방향, polarity (depression 혹은 elevation), 내부파의 위치와 관측 시간 등을 들 수 있으며 연속적으로 동일한 내부파의 촬영이 가능한 경우 전파속도도 분석이 가능하다. 그리고 이들 정보로부터 해양 상층부에서의 역학적인 측면을 유추해 낼 수도 있다. 이 밖에도 내부파의 특성 너비(characteristic half width)의 관측을 통하여 내부파의 형태나 진폭 등을 유추해 낼 수 있다(Zheng *et al.*, 2001). 내부파의 현장 관측에 따른 어려움으로 인하여 최근에는 위와 같이 SAR 영상만으로 내부파의 특성을 유추해 내거나 수치모델을 이용하는 연구가 많이 이루어지고 있다. Azevedo *et al.*(2006)은 hot-spots과 같이 내부파를 발생시키는 해역을 추적하기 위하여 국부해역 내부파 발생 기작에 대한 연구를 하였으며 이를 이용하여 SAR 영상에 나타난 내부파의 발생 해역을 역추적 할 수 있음을 제안하였다. Li *et al.*(2000)은 SAR 영상에서 일정한 간격을 두고 관측되는 파군들에 대하여 그들이 조석에 의하여 발생된다는 가정 하에 군속도를 산출하고 이를 두층 유한 수심 모델에 적용하여 혼합층의 수심을 계산하였다. Liu *et al.*(1998)은 솔리톤이 일련의 파군 형태로 분산된 후 혼합층의 수심과 그 아래의 수심이 동일한 한계 수심의 전환점을 통과한 후 elevation 형태의 내부파로 전파되는 것을 SAR영상을 통하여 관측하고 이를 수치 모델로 재현하였다. Hsu *et al.*(2000)은 서해에서 두 파군간의 비선형 간섭 현상을 SAR영상을 통하여 관측하고 이를 수치적으로 재현하였다. Orr and Mignerey (2003)도 남지나해에서 촬영한 SAR 영상으로부터 내부파의 전파에 따라 depression 형태에서 elevation 형태로 발전하는 것을 관측하고 이를 간단한 수치 모형을 이용하여 정성적으로 재현하고 분석하였다. 그러나 위와 같이 SAR 영상 관측 자료만을 가지고 자료를 처리하거나 수치모델을 이용하는 것은 내부파의 특성을 연구하는데 있어서 한계가 있다. 또한 정확하게 정량적인 자료를 생산하는가에 대한 검증작업이 필요하나 이를 검증할 만한 현장 관측 자료는 많지 않다.

효과적인 현장 관측을 위해서는 내부파가 자주 관측되는 해역에 서미스터 체인이나 ADCP와 같이 해양의 여러 층에서의 수온 분포와 속도 분포를 동시에 관측할 수 있는 기기를 설치하여야 하며 이에는 많은 비용과 시간이 소요 된다. 특히 서해안과 같이 양식과 해저 생물 채취 등의 어업 활동이 활발한 해역에서는 분실 및 망실의 위험성도 크다. 또한 내부파가 항상 존재하는 것이

아니고 해양 환경에 따라 발생 위치나 전파 경로가 변화하므로 관측 기기를 설치하더라도 내부파가 발생되지 않거나 그 해역을 통과하지 않을 때는 관측되지 않는 경우도 많다.

현장 관측과 위성 관측을 병행할 경우 가장 이상적인 자료는 내부파가 현장에 설치한 관측기기를 통과할 때의 자료와 이와 동시에 관측된 SAR 영상일 것이다. 그러나 내부파의 발생과 전파가 전체 해역에서 일어나는 것이 아니고 해양의 상태나 조석 혹은 바람의 상태에 따라 시공간적으로 불규칙하게 발생하며 또한 위성의 궤도 주기에 의한 관측 시점의 제한으로 인하여 정확하게 내부파가 관측기기를 통과할 때 SAR 영상을 동시에 획득하는 것은 많은 어려움이 있다. 따라서 동일한 내부파가 현장과 위성에서 동시 관측되지 않은 상태에서 일정한 시간 차이가 있을 때 현장 관측에서 나타난 내부파를 SAR 영상에서 추적하여 찾는 것은 매우 필요한 연구이며 이를 통해서 시공간적인 내부파 분석 연구도 가능하다.

본 연구에서는 2002년 5월말에 서해 연안 어청도 인근 해역에서 현장 관측된 내부파 자료와 RADARSAT SAR 영상을 분석한다. 앞서 언급한 바와 같이 내부파가 현장 관측 지점을 통과한 전/후에 영상이 획득되었기 때문에 영상에서 나타나는 내부파가 현장에서 관측된 내부파 중 어디에 위치하는지 분석 한다.

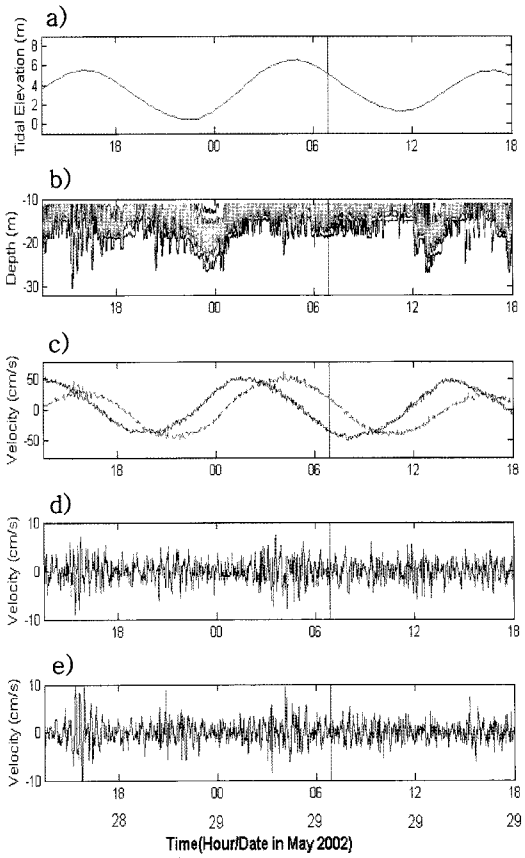

Fig. 3. Time series data of a) tidal elevation, b) temperature profile, c) horizontal velocity at 53.24 m depth(u for solid line, v for dashed line), d) filtered velocity of u, e) filtered velocity of v. The vertical line in the figure indicates SAR image acquisition time.

4. 내부파 현장 관측 및 SAR 영상 관측 자료 분석

2002년 5월 서해안에서 SAR영상 관측(Fig. 1)이 이루어지는 시기를 전후하여 ADCP 및 서미스터 체인을 이용한 현장 계류 관측도 동시에 이루어 졌다(김과 최, 2003). ADCP의 경우 어청도 인근 해역의 수심 61 m의 지점에 설치되어 4 m 간격으로 매 2 분마다 각 수심에서 수평 유속과 수직 유속을 관측 하였으며 이로부터 약 1 km 떨어진 지점에는 4 m 간격으로 수온 센서가 배열된 서미스터 체인을 계류하여 1 분간격으로 수심에 따른 수온 변화를 관측하였다(김과 최, 2003). Fig. 3은 시간에 따른 수온 변화와 유속 변화를 보여주는 그림으로서 a)는 계류 관측이 이루어진 인근 위도에서의 조위 관측 자료이고 b)는 전체 관측 수심에서의 등온선의 변화를 보여 주고 있으며 c)는 수심 53.24 m에서의 u 성분과 v 성분의 유속 변화를 보여 주고 d)와 e)는 각각 관측한 유속 u와 v에서 조석 성분을 제거한 후의 유속 변화를 나타낸다. 등온선 분포를 보면 depression 형태의 내부파가 연속하여 관측 지점을 통과하고 있음을 볼 수 있으며 최대 진폭이 30 m에 이르는 경우도 있다. 5-6개의 파로 이루어진 파군이 통과하는 양상이 뚜렷하게 보이는 경우도 있으며 파들의 중첩 등으로 인하여 한 개의 그룹으로서 파동의 양상을 보이는 경우도 있다. 유속의 경우에도 내부파의 진행에 따른 입자 운동으로 유속계에 관측되는데 등온선의 분포에서 내부파가 나타나는 시간에 톱니 모양의 유속 변화를 볼 수 있다. d)와 e)는 필터링 기법을 사용하여 조석성분을 제거한 후의 유속 변화를 그린 것이다. c)와 비교할 때 더 뚜렷하게 내부파의 입자

운동으로 인한 유속 변화를 관측할 수 있으며 특히 수심에 따른 등온선의 시간변화(b)에서 뚜렷하게 내부파가 관측되는 시기에 역시 유속의 변화도 큰 것을 볼 수 있다.

2002년 5월 29일 서해연안에서 내부파 현장 관측이 이루어지는 동안에 수행된 SAR 관측에 있어서 다수의 내부파가 관측되었음에도 불구하고 SAR 관측이 이루어진 시간에는 이미 내부파군이 관측기기를 통과한 후였고 몇 시간 후 또 다른 내부파군이 관측 기기를 통과하였다. 따라서 정확한 내부파의 시공간적인 분석을 위한 가장 적합한 두 개의 자료를 동시에 관측하지는 못하였다. 대양이나 우리나라 동해에서와 같이 큰 규모의 소수의 내부파가 관측되는 경우와는 달리 서해 연안에서 관측되는 내부파는 다양한 방향으로 전파하는 소규모의 내부파가 다수 관측되는 경우가 많아서 현장 관측 기기를 통과한 내부파가 SAR 영상에서 어디에 위치하는지 분석하는 것은 쉽지 않다.

Fig. 4는 Fig. 1의 서해안 RADARSAT SAR 영상의 박스 부분을 확대한 것이며 정확한 거리 계산을 위하여 기하 보정을 수행하였다. 영상에 표시된 H04는 서미스터 체인을 설치한 위치이다. 영상에서 보다시피 설치된 관측 기기 주변 해역에서 다수의 내부파 군을 관측할 수 있으며 다양한 전파 방향과 크기를 갖고 있는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 이 영상에 나타난 여러 개의 내부파 군 중에서 관측 기기를 통과하는 전파 방향을 갖는 A), B) 그리고 C) 내부파 군에 대하여 분석을 하고 이 내부파 군이 수심에 따른 등온선 변화에서 어느 시점에 위치하는지 알아본다.

Fig. 4에 나타난 A), B) 그리고 C) 내부파 군은 북서쪽 방향으로 전파하고 있으며 비교적 일정한 방향으로 정렬되어 있는 것으로 보아서 동일한 지점에서 발생하여 전파하는 내부파임을 짐작할 수 있다. 세 개의 내부파군 사이의 거리를 측정하여 보면 A)와 B)의 거리는 15.041 km이고 B)와 (C)의 거리는 13.752 km로 발생 해역으로부터 멀어짐에 따라 내부파군의 간격이 증가하는 것을 볼 수 있으며 파군 내에서의 파들의 파장을 분석하면 평균 파장이 A)파군에서는 733.3 m, B)파군에서는 386 m 그리고 C) 파군에서는 322 m이고 전체 3개의 내부파 군의 평균 파장은 481.4 m로 관측 되었으며 파군간의 거리와 마찬가지로 파의 진행에 따라 내부파 군의 파장도 증가하는 것으로 나타났다. 관측 기기

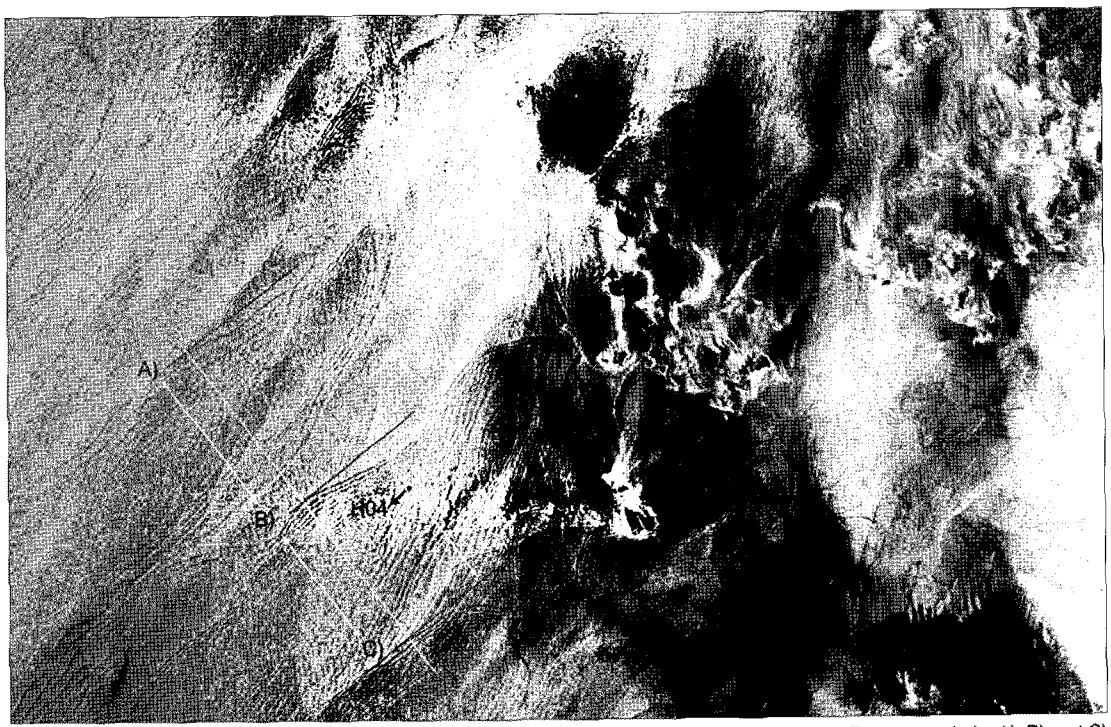

Fig. 4. An enlarged image of the rectangle in Fig. 1. H04 is the location of mooring measurements of Thermistor chain. A), B) and C) indicate the front of leading waves of internal wave packets.

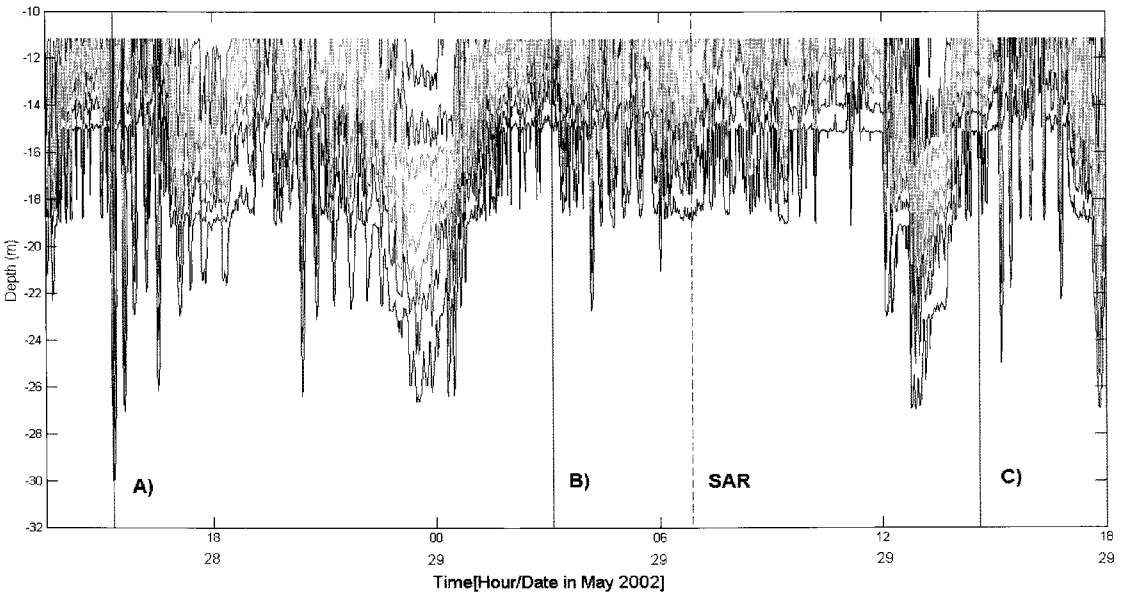

Fig. 5. Time series of isothermal depth. A), B) and C) indicate the estimated time when the internal wave packets in Fig. 3 pass the mooring point of thermistor chain.

계류해역의 인근에 위치한 위도의 조위 관측값(Fig. 3의 a)을 보면 SAR 영상 관측이 이루어진 시점에서의 조석 주기는 약 11시간 30분으로 나타났으며 이를 기초로 내부파군의 평균 속도를 계산하면 A)와 B) 사이에서는 약 0.36 m/s, B)와 C) 사이에서는 0.33 m/s로 계산되며 이는 Li *et al.*(2008)이 동지나해에서 관측한 내부파의 전파 속도로 계산한 0.2-0.3 m/s에 근접한 값이다. 파군간의 거리와 조석 주기를 이용하여 계산된 파군의 평균 전파 속도와 영상에 나타난 서미스터 체인의 계류 위치와 A), B) 그리고 C) 내부파 군의 거리를 이용하여 각 내부파군이 관측기기를 통과한 시간을 추산하면 SAR 영상 관측이 이루어진 시간으로부터 A) 내부파 군은 15시간 33분 전에 B) 내부파 군은 3시간 45분전에 그리고 C) 내부파군은 7시간 43 분 후에 통과하는 것으로 추산되었으며 이를 그림에 표시하면 Fig. 5와 같다. 그림에서 보면 현장 관측된 내부파 중 뚜렷하게 내부파 군을 나타내는 지표로서 선두의 파는 큰 진폭을 갖고 점차 그 진폭이 줄어드는 경향이 있는데 이를 바탕으로 각각 다른 내부파 군으로 분류할 수 있다. Fig. 5에서 A) 내부파 군은 30 m 이상의 진폭을 갖는 내부파군의 시작 부분과 거의 일치하며 B)와 C) 내부파군은 뚜렷하게 시작되는 내부파의 관측시간 보다 일찍 통과하는 것으로 나타났다. B)와 C)의 내부파군의 관측기기 통과 시간과 실제 관측 시기가 다른 이유에 대해서는 아직 더 많은 분석이 필요하나 가장 큰 원인으로는 내부파 군이 진행할 때 파봉선의 형태가 평행한 직선이 아니고 완만한 곡선의 호상(arc)이라는 점을 들 수 있다. 영상에 나타난 내부파의 형태를 가지고 계산한 거리와 전파 속도는 내부파의 최선두 지점에 대하여 이루어 졌으며 관측 기기가 최선두 파봉이 통과하는 지점에 위치하지 않고 그 보다 옆에 위치한다는 점은 도달시간의 계산에 있어서 오차를 발생시킬 수 있다. 향후 이에 대해서는 여러 자료와 분석을 통하여 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

5. 결론 및 제언

본 내부파 연구에서는 SAR 영상에서 관측된 서해의 내부파에 대하여 동시에 관측된 내부파 현장 관측 자료로부터 동일한 내부파를 추적 · 분석하는 연구를 수행하였으며 이를 통하여 서해의 내부파의 특성에 대한 이해와 함께 향후 현장 관측을 통한 연구 방향을 제시 하고자 하였다. 본 연구에서 획득한 SAR 영상에 나타난 내부파와 현장 관측에서 나타난 내부파를 추적 비교한 결

과 평균 파장은 약 484.1 m, 평균 주기는 약 18.8 분으로서 대양이나 동지나해에 분포하는 내부파에 비하여 소규모의 내부파로 관측되었으며 남서 해역에서 조석 변화에 의하여 발생하여 북서쪽으로 전파해 가는 것으로 추정된다. 그러나 아직 내부파의 발생 기작과 전파과정과 소멸 과정 등을 정확히 이해하기 위해서는 보다 많은 위성 관측과 현장 관측 연구가 필요하다. 향후 우리나라의 아리랑 5호가 운영되면 상당히 많은 내부파 영상 관측 자료가 축적될 것으로 기대되는바 이러한 자료가 가치 있게 활용되기 위해서는 최대한 빨리 내부파에 대한 장기 모니터링 계획을 수립하여야 할 것이다. 즉 내부파가 자주 관측되는 인근 해역에 ADCP나 서미스터 체인과 같은 장비를 장기 계류하여 장기 모니터링에 대한 계획을 수립하는 것이 시급하며 내부파가 관측 기기를 통과할 때 동시에 SAR영상 관측이 항상 가능하지 않은 것을 고려하여 동일한 내부파를 추적하는 기술을 보다 발전 시켜야 할 것이다.

여름철에 빈번히 출현하는 서해안의 내부파는 식물 플랑크톤의 생태는 물론 동물 플랑크톤과 어류의 생태에도 큰 영향을 끼칠 것으로 사료되며 이에 대한 연구는 해양 생물학적인 연구에 대한 기여 뿐 만 아니라 보다 효과적인 어업 활동에도 도움을 줄 것이다. 또한 서해연안에서의 복잡한 내부파의 분포는 해양 내부에서의 음파의 전달에 상당한 영향을 끼칠 것으로 생각한다. 현재까지의 서해연안에서 이루어진 많은 물성 관측 연구가 SAR영상에서 관측되는 수많은 내부파를 고려하지 않고 이루어져 왔다. 해양 물리 현상 관측에서 가장 중요한 수심에 따른 염분과 수온의 관측의 경우 밀도 약층의 수심을 분석하는 것이 중요한 요소인바, 내부파로 인하여 이러한 수온 약층이 일정한 주기로 10 m 이상의 진폭을 갖고 계속 이동 한다면 이 해역에서 관측된 물성 관측 자료는 정상상태(staionary)를 가정하고 이루어지는 선상 관측에 상당한 오차를 제공할 수 있다. 향 후 서해안의 경우 이를 감안한 선상 관측 계획을 수립하여야 할 것이며 또한 내부파를 고려한 서해연안의 물성 분석 연구가 이루어질 경우 그 특성을 이해하는데 기여할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국항공우주연구원의 다목적실용위성 5호 시스템종합개발사업의 지원으로 수행되었습니다. 논문 발간은 군산대학교 해양개발연구소에서 일부 지원받았습니다.

참고문헌

김태림, 원중선, 1999. SAR를 이용한 제주도 북부 해역에서의 내부파 관측예, '바다', 한국해양학회지, 4(1): 18-24.

김태림, 최현용, 2003. SAR와 현장 관측에 의한 황해 어청도 주변 해역에서의 내부파 특성, 바다, 8(2): 132-137.

Apel, J. R., J. R. Holbrook, A. K. Liu, and J. J. Tsai, 1985. The Sulu Sea internal soliton experiment, *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1625-1651.

Azevedo A., J. C. B. da Silva, and A. L. New, 2006. On the generation and propagation of internal solitary waves in the southern Bay of Biscay. *Deep sea research I*, 53(6), 927-941.

Gerkema, T. and J. T. F. Zimmerman, 1995. Generation of nonlinear internal tide and solitary waves, *J. Phys. Oceanogr.*, 25, 1081-1094.

Holligan, P. M., R. D. Pingree, and G. T. Mardell, 1985. Oceanic solitons, nutrient pulses and phytoplankton growth. *Nature*, 314, 348-50.

Holloway, P. E., E. Pelinovsky, T. Talipova, and B. Barnes, 1997. A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian north west shelf, *J. Phys. Oceanogr.*, 27, 871-891.

Hsu, M. K., A. K. Liu, and C. Liu, 2000. A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR, *Continental shelf research*, 20, 389-410.

Lamb, K. G., 1994. Numerical experiments of internal wave generation by strong tidal flow

across a finite amplitude bank edge, *J. Geophys. Res.*, 99, 843-864.

Lee J. H., I. Lozovatsky, S. T. Jang, C. J. Jang, C. S. Hong, and H. J. S. Fernando, 2006. Episodes of nonlinear internal waves in the northern East South Sea. *Geophysical research letters*, 33, L18601.

Li, X., P. Clemento-Colon, and K. S. Friedman, 2000. Estimating oceanic mixed layer depth from internal wave evolution observed from RADARSAT-1 SAR. Johns Hopkins Applied Physics Laboratory, *Technical Digest*, 21, 130-135.

Li, Xiaofeng, Z. Zhao, Z. Han, and L. Xu, 2008. Internal solitary waves in the East China Sea, *Acta Oceanologica Sinica*, 27(3), 51-59.

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.

Munk, W. H. and C. Wunsch, 1998. Abyssal Recipes II: energetics of tidal and wind mixing. *Deep Sea Research*, 45, 1977-2010.

Orr, M. H. and P. C. Mignery, 2003. Nonlinear internal waves in the South China Sea:Observation of the conversion of depression waves to elevation internal waves, *J. Geophys. Res.*, 108(C3), 3064.

Ramp R. S., T. Y. Tang, and F. T. Duda, 2004. International solitons in the northeastern South China Sea: Part I Sources and deep water propagation. *IEEE journal of Oceanic Engineering*, 29, 1157-1181.

Teixeira M., A. Warn-Varnas, and J. Apel, 2006. Analytical and observational studies of internal solitary waves in the Yellow Sea, *Journal of Coastal research*, 22(6), 1403-1416.

Yang J., S. Zhou, and J. X. Zhou, 2004. Internal wave characteristics at the ASIAEX site in the East China Sea, *IEEE Journal of oceanic Engineering*, 29(4), 1054-1060.

Zhao Z., V. Klemas, Q. Zheng, and X. H. Yan, 2004. Remote sensing evidence for baroclinic tide origin of internal solitary waves in the northeastern South China Sea, Geophysical research letters, 31: L06302.

Zhao, Z. and M. H. Alford, 2006. Source and propagation of internal solitary waves in the northeastern South China Sea, *J. Geophys. Res.*, 111: C11012.

Zheng, Q., Y. Yuan, V. Klemas, and X. H. Yan, 2001. Theoretical expression for an ocean internal soliton synthetic aperture radar image and determination of the soliton characteristic half width, *J. Geophys. Res.*, 106(C11), 31415-31423.