Korean Journal of Remote Sensing, Vol.27, No.4, 2011, pp.403~410

총 설

연안 환경 요소에 대한 지상 원격 관측 방법 고찰

- 마린 레이다와 카메라 시스템 관측을 중심으로 -

김태림† · 장성우

군산대학교 해양건설공학과

Examination of the Ground Remote Monitoring System for Coastal Environmental Elements

- Marine Radar and Camera System -

Taerim Kim† and Seongwoo Jang

Dept. of Coastal Construction Eng., Kunsan National Univ.

Abstract : Consistent observation with high temporal and spatial resolution is required for an efficient monitoring of coastal environments. Remote monitoring system installed on the ground is capable of simultaneous observation of wide coastal area and consistent observation with high frequency, which a small number of in-situ measurements cannot manage. This paper studies two typical ground based coastal monitoring system, marine radar and camera system. Marine radar can produce time series of frequency spectrum by integrating wave number spectrum calculated from spatial and temporal variation of waves in the radar image. The time averaged radar images of waves can analyze wave breaking zone, rip currents and location of littoral bars. Camera system can observe temporal variation of foam generation originated from coastal contamination as well as shoreline changes. By extracting the part of foams from rectified images, quantitative analysis of temporal foam variation can be done. By using the two above systems of different characteristics, synergetic benefit can be achieved.

Key Words : coastal environment, marine radar, camera system, wave, foam

요약 : 연안 환경에 대한 효과적인 관측을 위해서는 높은 주기 및 공간 해상도의 지속적인 관측이 필요하다. 지상에 설치한 기기로부터 이루어지는 원격 관측은 소수의 현장 기기 개수로는 관측할 수 없는 넓은 범위의 해역을 동시에 관측할 수 있고 또한 높은 빈도의 지속적인 관측이 가능하다. 본 연구에서는 연안 환경에 대한 대표적인 지상 원격 관측 기기인 마린 레이다와 카메라 시스템의 활용에 대하여 고찰해본다. 마린 레이다는 시간적으로 연속된 레이다 영상으로부터 파수 스펙트럼을 계산하고 이를 통합 적분하고 조정 전달 함수를 적용하여 시간에 따른 주파수 스펙트럼을 산출할 수 있다. 또한 시간에 따른 파랑 레이다 영상을 평균함으로서 쇄파대와 이안류 그리고 연안사주의 위치 등에 대한 분석도 가능하다. 카메라 시스템은 해안선

접수일(2011년 6월 28일), 수정일(1차 : 2011년 7월 15일, 2차 : 7월 29일), 게재확정일(2011년 8월 2일).

† 교신저자: 김태림(trkim@kunsan.ac.kr)

의 변화뿐만 아니라 오염 등으로 인하여 해안에서 발생하는 거품 발생량의 변화에 대한 분석을 할 수 있다. 빗각 촬영된 거품 영상을 기하 보정 후 거품부분을 따로 추출함으로서 거품량에 대한 정량적인 분석이 가능하다. 위의 두 기기는 각기 그 특성이 다른 센서로서 이를 동시에 활용하면 연안환경 관측에 있어 시너지 효과를 얻을 수 있다.

1. 서 론

최근 친수 공간의 확보와 해양 레저 활동의 증가로 연안 개발이 활발해짐에 따라 그로 인한 환경 영향에 대한 관심이 증대 되었다. 또한 안전한 연안 활동을 위하여 위험 요소에 대한 모니터링도 필요하게 되었다. 이를 위해서는 광역 연안에서의 필수 환경 요소에 대한 지속적인 관측이 필요하며 특히 자동으로 시스템이 운영되는 것이 가능하여야 한다.

연안의 특정 환경 요소를 관측하는 방법에는 현장 관측과 원격 관측이 있다. 현장 관측의 경우 주로 국부 관측(point measurement)으로 이루어지는 접촉식 관측으로 측정기기를 직접 연안에 설치 운영하는 것으로서 해수의 모든 수층을 정확히 측정할 수 있다는 장점이 있으나 장비가 고가인 경우가 많고 유지 보수에 인력과 비용이 많이 소모되며 망실의 위험도 크다. 특히 자료 수집을 위해서는 별도로 자료 전송시스템을 구축하거나 직접 현장에서 자료를 회수하여야 하는 경우도 많다. 원격 관측의 경우 영역 관측(area measurement)으로 이루어지는 비접촉식 관측으로 위성을 이용한 방법과 근거리 육상에서 장비를 직접 해수에 넣지 않은 상태에서 관측하는 방법이 있다. 위성 관측의 경우 광역의 해역을 동시에 관측할 수 있다는 강점이 있으나 조석 등으로 인하여 지속적으로 변동하는 특정 연안을 높은 공간 및 주기 해상도로 관측 하는데는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 지상에서 이루어지는 원격 관측만을 논하기로 한다.

원격 관측은 표층의 정보만을 획득할 수 있다는 단점이 있으나 장비가 육상 혹은 해상 위에 위치하므로 유지 보수가 용이하고 망실의 위험도 크게 줄어든다. 특히 현장 관측의 경우 넓은 해역을 관측해야 하는 경우 다수의 관측 기기가 필요하나 원격 관측은 소수의 기기로 넓은 영역을 동시에 관측할 수 있다.

본 연구에서는 최근 활용도가 증가하고 있는 마린 레이다와 카메라 시스템을 이용하여 연안 환경에 대한 원격 관측의 예를 통하여 분석 방법 및 활용 방안을 알아본다.

2. 마린레이다를 이용한 파랑 관측

해안에서의 공간적인 파랑 분포에 대한 실시간 관측은 통상 파고가 높은 너울과 같은 장주기성 고파에 의한 인명 피해를 줄이고 해안 침식으로 인한 해안 시설 붕괴를 막는데 중요하다. 특히 최근에 발생 빈도가 높아지고 있는 이안류와 같이 공간적인 요소에 대한 관측을 위해서는 소수의 현장 관측기기로는 현상의 포착이 어려워 마린 레이다와 같은 공간 관측 방법을 사용하는 것이 바람직하다. 이외에도 해안에서의 연안사주의 위치나 외해의 해상 기지에서의 파랑에 의한 위험 대비를 위한 관측시 마린레이다 관측을 활용하고 있다(Ruessink *et al.*, 2002). 본 연구에서는 미국 캘리포니아의 몬테레이 해안에서 운영 중인 마린 레이다 관측 시스템을 통하여 2008년 9월에 관측된 자료를 바탕으로 그 관측 방법을 고찰하여 본다(Fig. 1). 미국의 서부 해안은 태평양으로

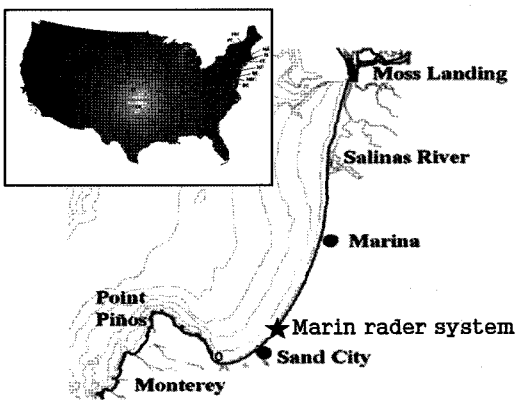

Fig. 1. Location map of marine radar system for monitoring nearshore waves.

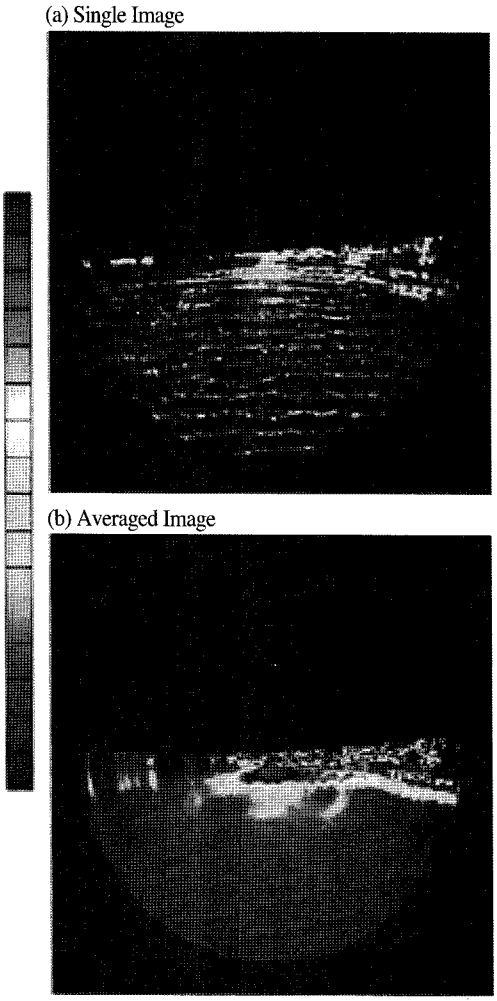

Fig. 2. (a) Marine radar image of coastal waters at 3 am on September 11, 2008 (b) An averaged image of 640 marine radar images.

부터 전파 되어 오는 파랑 에너지의 대부분이 소멸되는 해역으로 너울, 연안 침식 등 파랑 관련 연구가 활발히 진행되고 있다(MacMahan *et al.*, 2006, Orzech *et al*, 2010). 또한 부이를 이용한 외해에서의 파랑 관측 시스템과 파랑 모델을 활용한 예보 시스템의 운용을 통해서 해안에서의 정확한 파랑 예보에 심혈을 기울이고 있다(CDIP, 2010). 특히 새로운 해안 파랑 관측 시스템의 일환으로 2007년부터 몬테레이 해안에 마린 레이다를 설치하여 공간적인 파랑 분포의 분석과 함께 장주기 파에 대한 연구를 위하여 시범 운영하고 있다. 사용하고 있는 시스템은 ISR 사 (Imaging Science Research)의 DIR (Digital Imaging Radar)로서 Si-TEX 레이다 안테나와 토대 그리고 노트북 컴퓨터와의 신호 교환을 위한 MDS 컨트롤 박스로 이루어져 있다.

마린 레이다는 안테나에서 송신된 신호가 해면에 의해 후방 산란되어 수신되는 신호를 해석함으로서 파랑에 대한 정보를 획득한다. Fig. 2(a)는 레이다 영상에 나타난 파랑의 형태를 보여주는 것으로서 이 때 파랑에 의한 음영 효과(shadowing effect)와 경사 변조(tilt modulation) 등에 의하여 레이다에 포착되게 된다(Nieto *et al.*, 2004). 이때 레이다는 24 rpm의 속도로 회전하며 640개의 영상을 획득하고 이를 모두 평균하면 Fig. 2(b)의 평균 영상을 얻을 수 있다. 평균 영상에서는 연속적인 파랑의 모습은 소멸되고 연안 사주나 이안류 혹은 흐름과 파랑과의 상호 작용에 의하여 쇄파가 강하게 나타나는 해역이 뚜렷이 나타난다. 또한 이 평균 영상에서는 해안의 여러 현상 중 순간 영상에서는 뚜렷하지 않고 시간에 따른 변동이 크지 않은 현상 즉 연안 사주, 이안류 등을 관측할 수 있다.

640개의 레이다 영상에 대하여 식 (1)과 같은 3차원 FFT(Fast Fourier Transform)즉 2차원 공간에 대한 2차원 FFT와 1차원 시간에 대한 FFT를 수행함으로서 32개의 주파수(wave frequency)에 대한 파수(wave number) 스펙트럼(K_x-K_y spectra)을 계산할 수 있다.

$$F(k_x, k_y, \omega) = \iiint \zeta(x, y, t) e^{-i(k_x x + k_y y + \omega t)} dx dy dt \quad (1)$$

여기서, ζ는 레이다 영상 신호 크기, k_x, k_y는 x축, y축 방향의 파수, ω는 각주파수를 나타냄.

Fig. 3은 레이다 영상 중 64 × 64 화소 영상으로 구한 32개의 파수 스펙트럼 중 첨두 에너지가 뚜렷하게 나타나는 12개를 나타낸 것으로 파수별 에너지의 분포를 보여주며 각 주파수별로 파랑 에너지가 전파되어 오는 방향을 분석할 수 있다. 파랑에너지에 대한 주파수 스펙트럼은 32개의 주파수에 대한 파수 스펙트럼을 각각의 주파수에 대하여 모든 방향에 대하여 적분한 후 각각의 주파수에 대한 에너지 값에 조정전달함수(MTF: Modulation Transfer Function)을 적용하여 구하게 된다(Trizna, 2006). 그러나 이때 조정전달함수는 경험적인 함수로서 이를 결정 하는 것은 용이하지 않으며 많은 현장 자료와의 검증 분석이 필요하다. 특히 바람 방향에 따라 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있어서 주의를

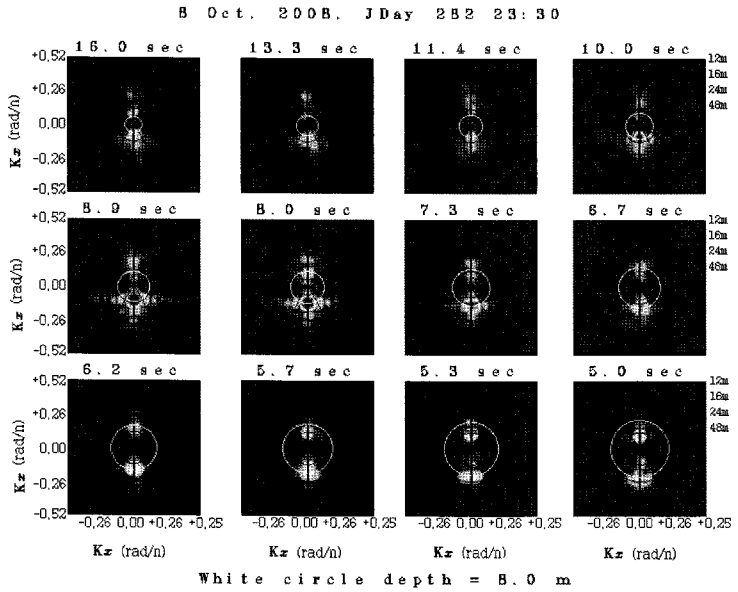

Fig. 3. Wave number spectrum for each frequency calculated from radar images of waves.

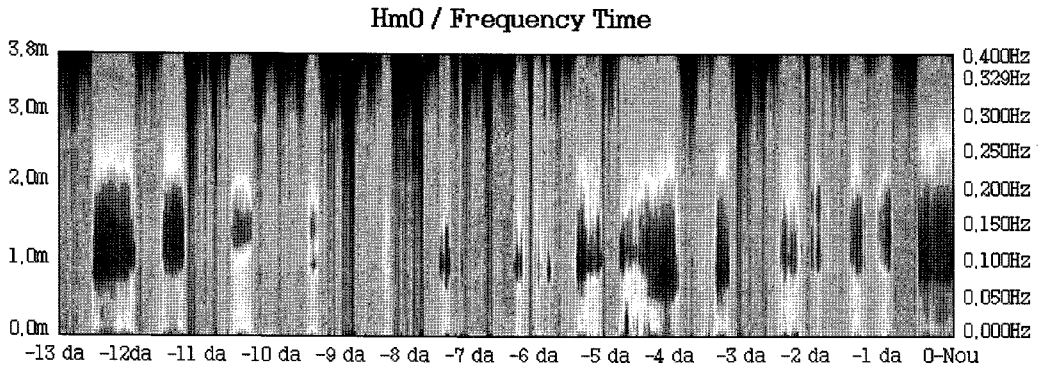

Fig. 4. Time series of frequency spectrum calculated from radar images of waves.

요한다. 최근에는 간섭형(coherent) 마린레이다를 이용하여 파랑에 따른 물 입자 궤도 운동 속도를 관측함으로서 조정전달함수를 사용하지 않고 파수 스펙트럼에서 직접 파랑 주파수 스펙트럼을 계산하는 방법이 연구되어 지고 있다(Trizna, 2010).

Fig. 4는 Fig. 3의 주파수별 파수 스펙트럼을 각각의 주파수에 대하여 모두 적분하여 계산된 주파수 스펙트럼을 13일간에 걸쳐서 나타낸 것이다. 가장 오른쪽에 나타난 스펙트럼이 현재의 스펙트럼을 나타내며 가장 왼쪽에 나타난 스펙트럼은 13일 전의 스펙트럼을 나타내는 것으로 시간에 따른 에너지 스펙트럼의 변화를 분석할 수 있다.

현재 우리나라의 경우 마린 레이다를 활용한 파랑 연구는 기초 연구 단계에 있으며 아직 파랑의 상시 모니터링에는 사용되고 있지 않은 실정이다. 최근의 동해안의 너울 내습에 의한 피해나 해운대에서의 이안류 등에 의한 사고 피해 등을 고려할 때 이러한 마린 레이다를 이용한 파랑 관측 시스템을 적극 사용할 필요가 있다.

3. 카메라 시스템을 이용한 거품 관측

레이다 영상에 비하여 카메라 영상은 보다 직관적인 정보를 제공할 수 있다. 또한 최근의 디지털 카메라 및 영상 처리 기술의 발달로 영상 자료로부터 단순한 정성적인 정보뿐만 아니라 정량적인 정보의 추출도 가능하다. 현재

까지 연안에서의 카메라 시스템은 주로 해안선 변화나 연안 사주 관측에 사용되었으며 스테레오 영상을 이용하여 파고 관측을 수행하기도 하였다(Alexande *et al.*, 2004, Ranasinghe *et al.*, 2004, Adam *et al.* 2011). 또한 조간대에서의 수륙 경계선의 이동을 관측함으로서 조간대 지형도를 계산하거나, 새만금 갑문의 개폐와 같이 연안 환경에 중요한 역할을 하는 경계 요소를 모니터링 하는데 사용되기도 한다. 최근에는 적외선 영상을 카메라 시스템에 도입함으로서 연안의 특정 환경 요소를 관측하기도 한다(Thomson, 2010).

새만금 방조제 건설 이후 만경강 및 동진강으로부터 유입되는 오염수는 새만금 내부에서 두 개의 갑문을 통하여 방출되므로 갑문 외해역에서의 수질 관측은 매우 중요하다(Fig. 5). 특히 2006년과 2007년 여름에 자주 발생한 가력도 갑문에서부터 변산 해수욕장에 이르는 거품띠의 형성은 예기치 못한 현상으로서 거품 자체로의 유해성은 밝혀지지 않았으나 미관상 유해하게 보임으로서 피서철 변산 주변의 관광객 감소에 영향을 끼쳤다. 2008년 이후 갑문 개방시 내 · 외부간의 낙차를 줄이는 등 외부적인 요인들을 제거함으로서 상당히 거품 발생이 줄어든 것으로 알려져 있으나 아직도 갑문 개방시 상당한 양의 거품이 발생하고 있다.

본 연구에서는 2010년 9월 가력갑문 앞 해상 타워에 설치한 카메라 시스템에 관측된 거품 영상으로부터 정량적으로 거품의 양을 산출하는 방법을 알아본다. 사용된 카메라는 올림푸스 SP-350 모델로서 800만 유효 화소수를 가지고 있으며 최대 이미지 크기는 3264 × 2448 Pixels 이다.

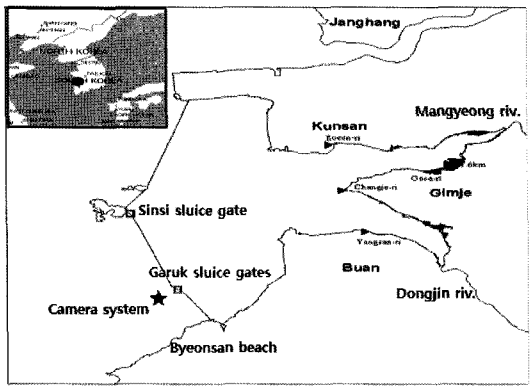

Fig. 5. Location map of camera system for monitoring foam generation from the Saemangum gate.

갑문에서 유출되는 내부수와 함께 발생하는 거품은 해수의 표층에 분포하면서 넓은 해역으로 확산되는데 이를 정량적으로 정확히 관측하는 것은 매우 어려운 일이다. 가장 합리적인 방법은 높은 곳에서 영상을 이용하여 거품의 확산 과정을 연속적으로 관측하는 방법이지만 현재 갑문 밖의 넓은 해역을 동시에 조망 할 정도의 높은 곳을 확보하기 어려운 형편이다. 그러나 가력도 갑문 바깥에 위치한 해상관측 타워의 경우(Fig. 5, 김 등, 2011) 갑문으로부터 근거리에 위치하고 있고 또한 정면에서 갑문을 촬영할 수 있으므로 갑문으로부터 발생하는 거품의 확산 범위를 모두 커버할 수는 없지만 갑문 근처의 상당부분의 해역을 관측할 수 있다. 특히 갑문 앞 해역의 일정 부분만을 표본 조사함으로서 거품의 발생량을 정량화 할 수 있다.

본 연구에서는 해상타워에 설치한 카메라로부터 획득된 영상(Fig. 6 (a))으로부터 정량적으로 거품의 양을 추출하기 위하여 식 (2)를 이용하여 영상을 기하 보정한다.

$$X - X_L = (Z - Z_L)\frac{m_{11}x + m_{21}y + m_{31}(-f)}{m_{13}x + m_{23}y + m_{33}(-f)}$$
$$Y - Y_L = (Z - Z_L)\frac{m_{12}x + m_{22}y + m_{32}(-f)}{m_{13}x + m_{23}y + m_{33}(-f)} \quad (2)$$

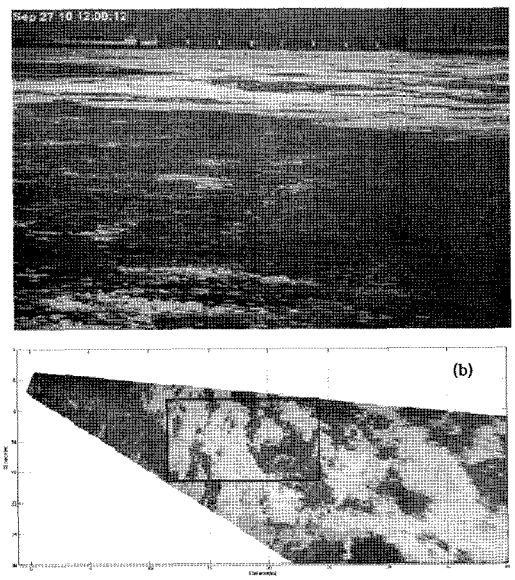

Fig. 6. (a)An oblique image of foam area generated from the gate opening. (b)A rectified image of (a). Red rectangular box indicates the area for the foam area calculation.

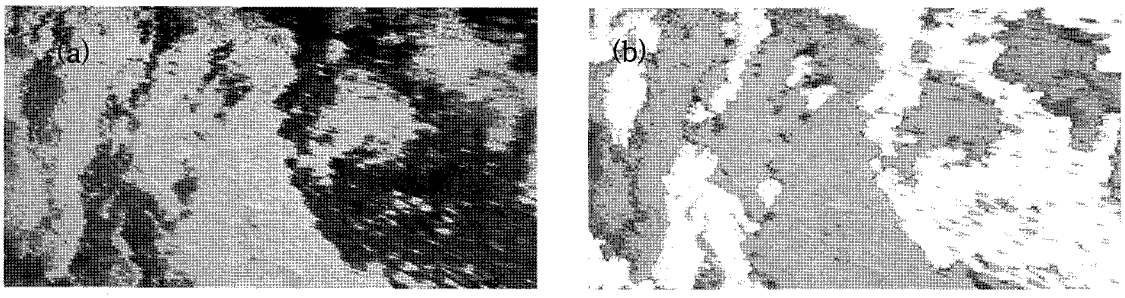

Fig. 7. (a) Enlarged image of the red rectangular box in Figure 6(b). (b)Area of foam part extracted from (a).

여기서 x, y는 사진상의 좌표, X, Y, Z는 사진 좌표에 대응하는 실제 지상 위치 좌표, X_L, Y_L, Z_L은 실제 카메라 위치, f는 초점 거리, $m_{i,j}$는 각각의 축에 대한 회전을 나타내는 행렬의 각각의 요소를 나타냄(Mikhai *et al.*, 2001).

그리고 기하 보정된 영상에서 거품이 차지하는 부분의 해역 넓이를 계산함으로서 거품 발생량의 변화를 분석하였다(Fig. 6 (b)). 즉 Fig. 6 (b) 내부의 붉은 박스의 경우 기하보정된 영상에서 한 개 화소의 실제 길이는 0.03 m로 박스에 해당하는 해역의 실제 면적은 $83.5m^2$ (= 411 pixels × 226 pixels)와 같이 계산된다.

본 연구에서는 이 박스에서의 거품 면적의 분포 변화를 계산함으로서 거품양의 변화를 분석하였다. 거품의 면적을 계산하기 위해서는 표본 영상에서 따로 경계선 검출 방법(edge detection)을 이용하여 거품 부분만을 추출한 후 그 부분에 대한 화소수를 계산 한다(Gozalez and Woods, 1993). 즉 표본 영상 Fig. 7(a)에서 거품부분만을 자동 추출한 영상이 Fig. 7(b)이며 거품 부분 영상의 픽셀수에 각 픽셀의 실제 면적 0.0009 m^2 (0.03 m × 0.03 m)를 곱하면 전체 거품 면적을 계산할 수 있다.

Fig. 7(b)의 경우 거품 화소 수는 모두 65502개 이며 이는 65502 × 0.03 m × 0.03 m = 58.95 m^2 의 면적임을 알 수 있다. 이 때 이 박스 부분의 해역이 갑문 앞 해역의 거품 발생 해역을 대표한다고 가정하면 표본 해역내의 거품 분포의 변화를 분석함으로서 거품 발생량에 대한 지표로 활용할 수 있다.

Fig. 8은 2010년 9월 11일 7시부터 12시까지 낙조시기 동안 갑문이 열렸을 때의 발생한 거품양의 변화를 분석한 것이다. 갑문 개방시 거품의 발생이 급격히 증가한 후 그 발생량이 서서히 감소하는 것을 알 수 있다. 비록 표층에서의 2차원 관측만이 이루어지므로 거품의 두께 등에 대한 정보나 포화 상태 이상의 거품 발생에 대한

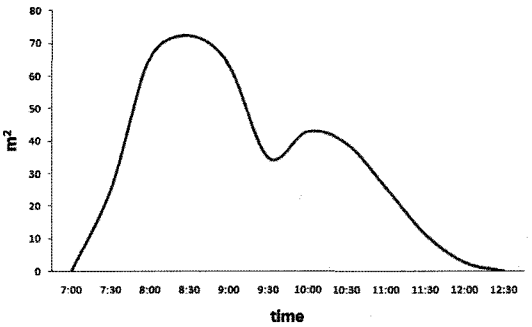

Fig. 8. Temporal variation of foam area from the box in Figure 6(b).

관측은 어렵지만 표본 해역의 영상 분석을 통하여 거품의 발생 시기와 변화량에 대한 관측은 가능하다.

거품 발생의 원인을 파악하기 위해서는 거품의 발생 정도와 주변 환경 혹은 내부 수질과의 연관성을 파악하는 것이 급선무이다. 이를 위해서는 갑문 개방 시 발생하는 거품 양 변화에 대한 관측과 함께 새만금 내부 수질에 대한 지속적인 모니터링이 중요하다.

4. 결 론

마린 레이다는 해안에서의 파랑과 이안류 및 쇄파대에 대한 정보뿐만 아니라 유류 오염 발생시 표층의 slicks를 관측하는데도 유용하게 사용될 수 있다. 특히 마린 레이다 시스템은 선박 등에서 많이 사용하고 있으므로 분석 방법을 보다 편리하게 사용할 수 있다면 그 활용도는 크게 늘어 날 것으로 보인다. 최근에는 육상의 자동차에 레이다를 부착하여 넓은 해안을 이동하며 레이다 관측이 이루어지기도 한다.

카메라 시스템은 야간에는 관측할 수 없다는 단점이 있으나 해안의 여러 현상에 대한 직관적인 분석이 가능

한 영상 자료를 제공한다. 거품 외에도 해색 분석을 통한 녹조 및 적조 등의 경우에도 표층에서 그 현상이 뚜렷하게 나타나므로 효과적인 관측이 가능하다. 해안에서의 수심 정보의 경우에는 파랑의 속도와 수심과의 관계식을 이용하여 표층 아래인 수심 정보를 추출할 수도 있다.

레이다가 갖는 능동센서의 장점과 관측 영상이 갖는 높은 해상도의 장점을 공동 활용하면 시너지 효과를 얻을 수 있으며 각각에서 관측한 정보에 대한 비교 분석도 가능하다. 파랑의 경우 마린 레이다와 카메라 영상으로부터 모두 파고 및 주기 등의 관측이 가능하며 표층의 후방 산란에 영향을 주는 거품의 경우에도 두 개 방법 모두 관측이 가능하다. 두 방법의 공동 활용을 통하여 해안에서 발생하는 여러 환경 요인에 대한 동시 관측은 물론 각각의 특징을 살린 정밀 관측도 가능할 것이다.

감사의 글

2008년도 몬테레이 마린 레이다 관측 자료를 제공하여 주신 Naval Postgraduate School의 Edward B. Thornton 교수님께 감사드립니다. 본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업 "새만금해양환경 보전대책을 위한 조사연구" 와 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었습니다(KRF-2008-313-D01095). 논문 발간에 도움을 준 군산대학교 해양개발연구소에 감사드립니다.

참고문헌

김태림, 박종집, 장성우, 2011. 새만금 갑문 개폐 자동 영상 관측 시스템 개발, 한국지리정보학회지, 14(1), 73-83.

Adam, J. B. and H. W. Chin, 2011. Virtual wave gauges based upon stereo imaging for measuring surface wave characteristics, *Coastal Engineering*, 58:305-316.

Alexander, P. S. and R. A. Holman, 2004. Quantification of nearshore morphology based on video imaging, *Marine Geology*, 208:101-111.

CDIP Homepage, 2010. Coastal Data Information Program. University of California at San Diego. Web site : http://cdip.ucsd.edu

Gonzalez, R. C. and R. E. Woods, 1993. Digital image processing, Addison-Wesley publishing company, NY, USA.

Holand, K. T., R. A. Holman, T. C. Lippmann, J. Stanley, and P. Nathaniel, 1997. Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22:81-92.

MacMahan, J. H., E. B. Thornton, T. Stanton, and A. J. H. M. Reniers, 2005. RIPEX : Observations of a rip current system, *Marine Geology*, 218: 113-134.

Mikhail, E. M., J. S. Bethel, and J. C. McGlone, 2001. Introduction to modern photogrammetry, John Wiley & Sons, NY, USA.

Nieto, J. C., G. R. Rodriguez, K. Hessener, and P. I. Gonzalez, 2004. Inversion of marine radar images for surface wave analysis, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21: 1291-1300.

Orzech, M.D., E. B. Thornton, J. H. MacMahan, W. C. O'reilly, and T. P. Stanton, 2010. Alongshore rip channel migration and sediment transport, *Marine Geology*, 271:278-291.

Ranasinghe, R., G. Symonds, K. Black, and R. Holman, 2004. Morphodynamics of intermediate beaches: a video imaging and numerical study, *Coastal Engineering*, 51:62

Ruessink, B.G., P.S. Bell, I. M. J. van Enchevort, and S. G. J. Aarninkhof, 2002. Nearshore bar crest location quantified form time-averaged X-band radar images, *Costal Engineering*, 45: 19-32.

Thomson, J., 2010. Observations of thermal diffusivity and a relation to the porosity of tidal flat

sediments. *Journal of Geophysical Research*, 115: 5016-5022.

Trizna, D. B., 2006. Monitoring coastal processes and ocean wave directional spectra using a marine radar, *Ocean 2006*, Singapore, Conference Proceedings.

Trizna, D. B., 2010. Coherent marine radar measurements of properties of ocean waves and currents, IGARSS 2010, *IEEE International*, 4737-4740.