부산 용호만에서 선박용 X-band 레이더에 의한 쇄파의 원격 모니터링

이 대 재*

부경대학교 해양생산시스템관리학부

Remote monitoring of the breaking ocean waves by a marine X-band radar in Yongho Man, Busan.

Dae-Jae LEE*

Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

This paper describes the remote monitoring of breaking ocean waves generated by Typhoon Nabi, whose name means butterfly in Korean, using a marine X-band radar in the Yongho Man, Busan, Korea. The basic purpose of this study is to investigate the dynamic behavior and to estimate the periods of breaking waves across the surf zone from radar image sequences. In these experiments, the land-based radar system imaged the inshore zone of three miles from the coastline to a isobath of 30 meters. The wave period and the dominant wave direction for breaking ocean waves extracted directly from radar image sequences were 157.4 meters and 298 degrees, respectively. However, the result calculated quantitatively by the continuous wavelet transform (CWT) showed that the period of breaking waves was 154.3 meters. The average difference in breaking wave periods between the value extracted by using EBRL (electronic bearing and range line) of radar and the calculated value by CWT was 3.1 meters, showing that the CWT method is also accurate. These results suggest that a marine X-band radar system is a viable method of monitoring the breaking ocean waves.

Keywords: Breaking wave, X-band radar, Wave period, CWT, Typhoon Nabi

서 론

2005년 8월 29일 괌 북동쪽 약 1,210km 부근
해상에서 이 해에 14번째로 발생한 나비 (Nabi)

는 오키나와 인근해역으로 접근하면서 중심기
압 925hPa, 중심부근 최대풍속 49m/s의 대형급
태풍으로 발달하였다. 그러나, 이 태풍은 점차

*Corresponding author: daejael@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-5889, Fax: 82-51-629-5885

세력이 약화되어 중형급 태풍으로 변화된 후, 9월 6일 06:00시 경 일본 규슈 남쪽 가고시마 연안으로 상륙하였고, 그 후, 북동 방향으로 진행하면서 9월 6일 16:00시경 부산에 근접한 시모노세키를 통과하여 동해상으로 진출함으로서 일본과 우리나라에 많은 피해를 초래한 태풍이다. 특히, 이 태풍 진로의 좌반원에 위치하였던 부산에 있어서는 9월 5일부터 7일 사이에 162mm의 강수량과 순간 최대 풍속 34m/s의 강풍이 관측되었고, 해안가에서는 20m/s 이상의 강한 바람과 거대한 파도가 해안을 엄습하여 어촌계 어선의 파손과 해안가 통행차량에 많은 피해가 발생하였다 (KMA, 2005). 일반적으로 태풍이 통과할 때에는 외해로부터 수심이 점차 얕아지는 연안 수역에서는 거대한 쇄파 (breaking wave)가 발생하기 때문에 이들 쇄파가 해안을 엄습하여 선박의 파손, 건물의 침수 및 이안류의 발생으로 인해 해저지형이 변화하는 현상 등이 나타난다. 또한, 황천 항해시 대형의 쇄파에 직면할 경우, 거대한 파봉 (crest)과 이로부터 공중으로 흩어져 날아오르는 강력한 포말 (water droplet)이 불규칙하게 선박을 엄습함으로서 중 소형 선박의 경우, 조종성이 급격히 저하되기 때문에 복원성이 손실되어 해난사고가 빈번하게 발생한다. 이와 같은 쇄파는 일반적인 해양파와 달리 파봉이 매우 잘 발달되어 있고, 또한 거대한 포말이 공중으로 분산되는 형태의 파동이기 때문에 전자파 에너지가 강하게 산란되는 특징이 있다 (Heiko et al., 2005). 따라서, 쇄파에 의한 전자파의 산란 특성을 정량적으로 분석하면, 쇄파의 거동 특성을 정량적으로 평가, 분석할 수 있다.

본 연구에서는 이 점에 주목하여 2005년 9월 우리나라에 많은 인적 및 물적 피해를 초래한 제 14호 태풍 나비가 부산 인근을 통과할 때, 선박용 X-band 레이더를 이용하여 부산 용호만 연안으로 엄습하는 쇄파의 레이더 영상을 실시간으로 수록하고, 쇄파가 엄습하는 거동 패턴 및 파장 등을 분석, 고찰하였다.

재료 및 방법

본 연구에서 태풍 나비의 영향으로 용호만으로 내습하는 쇄파를 원격 모니터링하기 위해 사용한 실험장치의 구성 계통도는 Fig. 1과 같고, 실험에 사용한 X-band 레이더 (MD-3840, Koden)의 성능특성은 Table 1과 같다. Fig. 1과 Table 1에서 실험은 부산 부경대학교 대연 캠퍼스 수산과학연구소 옥상에 설치된 12inch 고분해능 X-band 레이더의 안테나 (4.5feet)에서 송신된 펄스 폭 0.15 μ s의 전자파가 용호만으로 내습하는 쇄파로부터 산란될 때, 먼저 쇄파의 echo 신호를 레이더 신호처리 모듈 (RTX, MECys. co., ltd.)을 사용하여 12bit의 분해능과 최대 40MHz (탐지거리 0.75 마일의 경우)의 주파수로서 수치화하였다. 이 때, 이들 PC에서는 레이더 안테나가 1회

Fig.1. A block diagram of experimental setup used in this study.

Table 1. Specification of the X-band radar used in the remote monitoring of breaking ocean waves

Items	Specifications
Transmitting frequency	9410 $\pm$ 30MHz
Antenna length	4.5feet
Peak power output	4kW
Beam width	Horizontal: 1.7° / Vertical: 25°
Rotation speed	25rpm
Pulse length (μ s)/PRF (Hz)	S:0.06/4000, M:0.15/2000, L:1.0/500
IF center frequency	60MHz
IF bandwidth	S/M: 20MHz, L: 5MHz
Noise figure	Better than 5dB
Operating temperature	-25° to +55°
Operation in wind	70knots

전할 때마다 거리 방향과 방위 방향으로 512×720 pixel의 echo memory map을 생성하고, 1 pixel의 영상 데이터를 8 bit의 256 color 데이터로 변환하여 harddisk에 수록하였다. 동시에 이와 같이 수치화된 X-band 레이더 영상 신호는 ECDIS (PM3D, MECys. co., ltd.)에 전송하여 전자해도 (ENC, KOHA) 상에 PPI 방식으로 중첩시켜 표시하였다. 본 연구에서 사용한 레이더 RTX 모듈은 전용 DSP (TMS320C32, Texas Instrument)와 고성능의 A/D 변환기 (AD9402, Analog device)를 탑재한 것으로 RTX와 host computer 사이의 데이터 교환은 DMA 채널을 통하여 수행하였고, 영상의 이득조정, 잡음제거, 영상신호의 수록 등은 ECDIS의 화면상에서 쇄파의 거동특성의 변동 상황을 관찰하면서 수행하였다. 또한, 이와 같이 수록된 레이더 신호는 후일 실험실에서 재생하여 목적에 따른 분석을 수행하였다(Lee et al., 2003a; Lee et al., 2003b).

한편, 본 연구에서는 CWT (Continuous Wavelet Transform) 기법을 이용하여 쇄파에 의한 레이더 echo 신호를 시간 및 주파수 영역에서 분석하고, 이로부터 echo spectrum의 peak를 자동 검출하여 용호만으로 엄습해오는 쇄파의 동적거동 패턴과 파장 등을 분석, 고찰하였다.

일반적으로 어떤 주파수 성분이 내포된 신호가 시간에 따라 끊임없이 변동하는 비정상파(non-stationary wave)의 경우, 그 파동의 거동을 정확하게 이해하기 위해서는 어떤 주파수 성분이 어떤 시간대에 나타나는가를 추적, 분석하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 쇄파에 의해 산란되는 레이더 echo 신호를 정량적으로 분석하여 쇄파의 주기, 즉 파장을 실시간으로 추정하기 위해 주파수 영역에 대한 CWT 기법을 활용하였다. 먼저, 주파수 영역에 대한 CWT함수 $W_f(a, b)$ 는 쇄파의 echo 신호를 $f(t)$, mother wavelet를 $\Psi(\omega)$, scale과 shift 파라미터를 각각 a, b , 각 주파수 (angular frequency) ω 에 대한 $f(t)$ 의 주파수 스펙트럼을 $F(\omega)$ 라 하면,

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \Psi\left(\frac{\omega - b}{a}\right) d\omega$$

으로 정의되고, 이 식에서 a, b 는 각각 시간의 역수와 주파수에 비례하는 값이다. 여기서, $W_f(a, b)$ 을 다른 형태의 식으로 나타내기 위해 주파수 영역의 적분을 Fourier 변환을 통해 시간영역의 적분으로 변환하면,

$$W_f(a, b) = 2\pi \sqrt{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \phi(at) dt$$

이 되고, 여기서, $\phi(t)$ 는 $\Psi(\omega)$ 의 Fourier 역변환으로서, $\Psi(\omega)$ 은

$$\Psi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left(-\frac{\omega^2}{2\sigma_f^2}\right) \exp(-j\omega t_0)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, σ_f 와 t_0 는 각각 시간주파수 분해능과 wavelet의 중심을 나타내는 상수이다. 따라서, 이들 식을 정리하여 주파수 영역에 대한 CWT함수 $W_f(T, \Omega)$ 을 나타내면,

$$W_f(T, \Omega) = \frac{1}{\sqrt{T}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp\left[-\sigma_f^2 t_0^2 \left(\frac{t}{T} - 1\right)^2\right] \exp(-j\Omega t) dt$$

이 되고, 여기서 $T = \frac{t_0}{a}$, $\Omega = b$ 이고, 시간 해상도

Δ_r 와 주파수 해상도 Δ_Ω 는 각각

$$\Delta_r = \frac{T}{\sqrt{2}\sigma_f t_0}$$

$$\Delta_\Omega = \frac{\sigma_f t_0}{\sqrt{2}T}$$

이 된다 (Nishimoto et al., 1997; Shie, 2002).

결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 레이더 신호 처리장치는 레이더에서 설정한 탐지거리에 따라 샘플링 주파수가 변화하도록 설계되었는데, 본 연구에서와 같이 탐지거리를 3 마일로 설정하였을 경우에 대한 샘플링 주파수는 13.82MHz로서, 이 주파수에 대한 샘플링 시간 간격과 거리 분해능은

각각 약 $0.072\mu s$ 와 $10.85m$ 이었다. 부경대학교 수산과학연구소 옥상에 설치된 레이더 안테나로부터 송출되는 전자파 펄스신호가 용호만 쇄파대로부터 산란되어 수신될 때, 방위방향으로 0.5° 간격, 거리방향으로 1개의 주사선당 512개의 샘플링 데이터를 취득하여 $512 \times 720\text{pixel}$ 의 레이더 영상 map을 작성하여 나타낸 결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 쇄파의 영상은 레이더 안테나로부터 진방위 76° 와 96° 사이의 20° 방위각 범위에서만 나타나고 있는데, 이것은 실험당시 96° 이상의 방위각 방향에는 이기대의 용호부두, 장산봉 및 LG 아파트에 의한 전자파의 그늘영역(shadow zone), 또한, 76° 이하에서는 광안대교에 의한 그늘영역에 의해 전자파의 차단이 발생하였기 때문이다.

또한, 본 실험에서는 외해의 30m 등심선(isobath) 밖의 수심 영역에서는 쇄파로부터 산란되는 전자파 echo 신호는 거의 관찰되지 않았기 때문에 X-band 레이더의 탐지거리를 3 마일로 설정하여 모니터링을 하였다. 이와 같이 수심이 30m 보다 깊은 부산 외해로부터 연안으로 접근하는 너울성 풍랑의 파봉이 X-band 레이더에 뚜렷하게 탐지되지 않은 이유는 마루가 둥글고 간격이 길기 때문에 전자파에 의한 산란이 강하게 발생하지 않았기 때문이라 판단된다. 그러나, 이 파랑이 연안의 수심 10m 근방의 급경사 해역으로 진입하게 되면 수심이 감소함에 따라 점차 마루가 솟아올라 뽀죽하게 되면서 파고는 높아지고, 파봉 사이의 간격이 점차 좁아지는 현상을 나타내었다. 그 후, 연안 쇄파대(surf zone)에 진입하면서부터 파봉이 부서지면서 물 입자가 공중으로 흩어지는 현상이 나타나 전자파가 강하게 산란되는 현상을 육안으로 관찰할 수 있었다. 본 연구의 주된 목적은 연안으로 내습하는 쇄파의 동적거동특성을 정량적으로 모니터링하는데 있다. 따라서, 여기서는 주로 쇄파의 파봉이 부서져 흩어지는 순간에 대한 전자파 echo 신호를 실시간으로 계측하여 연안 쇄파대에서 쇄파

의 이동패턴을 파악하기 위해 쇄파의 관측에 방해가 되는 해면에 의한 gaussian 성의 잡음은 미리 잡음제거기능(Anti-clutter)을 가동하여 억제시켰다(MECys co., ltd., 2006).

Fig. 2에서 연안 쇄파대에서 관측되는 쇄파의 생성과 이동패턴을 해저 지형과 연관시켜 분석하기 위해 용호만의 3차원 해저지형도(PM3D, MECys co., ltd.)를 작성한 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 쇄파는 레이더 안테나로부터 진방위 95.6° , 거리 2.25 마일의 수역, 즉 $35^\circ 07.874' N$, $129^\circ 09.243' E$ 의 수심 4.6 m 지점에서부터 X-band 레이더에 관측되기 시작하여 진방위 298° 방향을 향해 남천 어촌계 방파제를 향해 내습하고 있음을 알 수 있다. Fig. 2 및 Fig. 3에서 쇄파는 외해로부터 수심이 $29.5m \rightarrow 17.7m \rightarrow 16.1m \rightarrow 4.6m \rightarrow 10.6m \rightarrow 16.2m$ 의 급경사의 해저 언덕의 등성이 수역으로부터 관측되기 시작하였다. 또한, Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 외해로부터 298° 방향으로 내습하는 쇄파는 안테나로부터 진방위 85.4° , 거리 1.36 마일의 쇄파대, 즉 Fig. 3의 a-b 경계역($35^\circ 08.203' N$, $129^\circ 08.153' E$)을 통과하면서부터 선명하게 식별되는 일직선상의 쇄파가 연속적으로 형성되어 남천 어촌

Fig. 2. X-band radar image for braking ocean waves in the surf zone superimposed on the ENC of ECDIS.

Fig. 3. Travelling direction of braking ocean waves showed on the 3D map of sea bottom for Yongho Man, Busan, Korea. The line of $\overline{ab}$ indicates the starting boundary of surf zone.

Fig. 4. Water droplets produced by a huge breaking wave at the breakwater of Namcheon fishing port.

계 내향을 향해 엄습하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 엄습하여 남천 어촌계의 방파제에 부딪혀 부서지는 파봉의 거동은 Fig. 4와 같다.

본 연구에서는 X-band 레이더가 설치된 부경대학교 인근의 남천동 해안가를 향해 내습하는 쇄파의 전자파 산란신호를 분석하기 위해 Fig. 2의 레이더 영상신호 중에서 쇄파가 관측되는 쇄파대에 대한 영상신호만을 추출하여 나타낸 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서는 쇄파의 동적거동을 실시간으로 추출하기 위해 레이더 수신부의 이득, anti-clutter 및 신호처리장치에서의 이득조정을 거쳐 출력되는 analog video signal를

Fig. 5. Display for range and bearing directions of X-band radar signals for braking waves measured in the surf zone.

Fig. 6. Envelope waveform of X-band radar signal for braking waves on a sampled sweep line of the surf zone.

12bit의 분해능과 13.82MHz의 주파수로서 양자화한 후, 거리와 방위를 x, y 평면좌표 값으로 변환하여 레이더 echo 신호를 나타내었다.

한편 Fig. 5의 쇄파역에서 관찰되는 쇄파를 대상으로 그 파봉 사이의 간격, 즉 쇄파의 주기를 CWT 분석에 의해 정량적으로 추정하기 위해 Fig. 5에서 임의의 한 레이더 소인선에 대한 echo 신호를 무작위로 추출하여 나타낸 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 종축은 전자파 echo의 상대진폭 레벨이고, 횡축은 전자파의 왕복시간 (μs)을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 echo 신호는 0(안테나 위치)부터 $500\mu s$ (2.93마일) 범위에 대하여 나타내었으나, $0 \sim 1.74\mu s$ 의 범위는 육지영역이므로 미리 echo신호를 소거하였기 때문에 echo 신호가 시작되는 지점이 해안선을 의미한다. Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 쇄파의 주기를 나타내는 echo 신호의 간격은 연안 쇄파대 외측 경계역에 해당하는 $18\mu s$ 부근으로부터 해안선을 향해 접

Fig. 7. Time-frequency representation obtained by wavelet transform of radar signal data measured near the shoreline.

근함에 따라 echo 신호의 출현 간격이 점차 좁아지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 쇄파대에 있어서 쇄파 파봉의 출현 주기, 즉 파장의 변화를 정량적으로 분석하기 위해 Fig. 6에서 연안 쇄파대의 구간을 두 개로 나누어 분석을 행하였는데, 그 결과는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7은 해안선에 가까운 쇄파대 내측 구간, 즉 $3.834 \sim 13.022 \mu\text{s}$ 의 구간에 대한 CWT 분석 결과이고, Fig. 8은 쇄파대 외측의 $12.371 \sim 21.558 \mu\text{s}$ 구간에 대한 CWT 분석 결과이다. 이들 그림에서 종축은 주파수 (MHz)이고, 횡축은 시간 (μs)이다. Fig. 7과 Fig. 8에서 가장 우세한 echo 성분은 모두 0.9719 MHz 에서 공통적으로 나타나고 있고, Fig. 7은 Fig. 8에 비해 1.620 MHz 와 1.836 MHz 에서 부가적으로 우세한 echo 신호 성분이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이들의 주파수 성분에 대한 쇄파의 파장을 계산하면, Fig. 7과 Fig. 8에서 가장 우세하게 나타나는 0.9719 MHz 에 대한 파장은 154.3 m 이고, Fig. 7에서 부가적으로 우세한 성분을 나타내는 1.620 MHz , 1.836 MHz 에 대한 파장은 각각 92.6 m 와 81.7 m 이었다. 한편, Fig. 8의 쇄파대 외측 영역에 나타나는 쇄파의 echo 영상을 대상으로, X-band 레이더의 PPI 스크opf 상에서 동일 방위선 상에 존재하는 두 파봉에 의한 echo 신호의 거리

Fig. 8. Time-frequency representation obtained by wavelet transform of radar signal data measured in the surf zone.

를 각각 측정하면 파장을 추정할 수 있다. 즉, 쇄파와 같이 두 파봉 사이의 간격(파의 주기)이 클 때, 이들 파봉에 의한 전자파 산란신호는 서로 분리되어 안테나에 수신되는데, 이 때, 연안을 향해 연속적으로 엄습하는 쇄파에 대한 n 번째 파봉의 레이더 거리를 R_1 , $n+1$ 번째 파봉의 레이더 거리를 R_2 , 전자파의 진행속도를 C , 전자파가 거리 R_1 과 R_2 를 왕복하는 데 소요되는 시간을 t_1 , t_2 라 하면, 그 두 파봉 사이의 거리차, 즉 쇄파의 파장 S 는

$$S = R_2 - R_1 = \frac{C(t_2 - t_1)}{2}$$

에 의해 구할 수 있다. 이 식에서 두 쇄파의 파봉을 분리, 식별하기 위해서는 $S \geq C\tau/2$, 즉 $S \geq 150\tau$ 의 조건이 성립되어야 함을 알 수 있다. 여기서, τ 는 $t_2 - t_1$ 이다.

따라서, 이 식을 이용하여 쇄파대 외측 영역에 나타나는 쇄파의 파봉 사이의 간격을 추정한 결과, 그 쇄파의 파장은 0.085 마일, 즉 157.4 m 이었다. 이들의 두 결과를 비교해 볼 때, 레이더의 스크opf 상에서 EBRL cursor를 이용하여 직접 측정한 결과는 CWT에 의한 추정결과보다 3.1 m 더 컸다. 그러나, 실제 레이더 화면에서 물표 영상의 간격을 EBRL cursor로부터 직독하는 경우에

Fig. 9. Three-dimensional map of X-band radar signals for breaking waves measured in the surf zone of Yongho Man, Busan.

는 레이더 영상의 확대효과에 기인하여 오차가 필연적으로 내포되기 때문에 세심한 주의가 필요하다 (Lee, 2000). 특히, Fig. 6과 Fig. 7에서 1~2MHz 사이의 영역에서 우세한 고주파수 성분이 출현하는 현상은 쇄파가 용호만의 외해측으로부터 내해측으로 이동함에 따라 수심이 감소하는 현상과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되고, 특히, 해안선 가까이에 있는 교량을 지탱하는 대형의 교각이 존재하여 이것에 의한 파랑의 반작용 역시 그 원인을 제공하고 있는 것으로 판단된다.

한편, 연안 쇄파역에서 탐지된 쇄파의 파고특성을 정량적으로 고찰하기 위해 파봉에 의한 전자파 산란신호를 3차원적으로 나타낸 결과는 Fig. 9와 같다. 일반적으로 이와 같은 쇄파에 의한 전자파 산란강도와 파고와의 관계를 정량적으로 분석하기 위해서는 사전에 많은 검증실험이 필요하지만, 본 연구에서는 쇄파가 내습하는 동적패턴의 분석에 주목하여 연구를 수행하였기 때문에 산란강도와 파고의 관계에 대한 연구는 수행하지 않았다. 그러나, Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 연안 쇄파대를 향해 접근하는 쇄파에 대한 전자파 echo 신호의 진폭 패턴을 고찰해 볼 때, 쇄파대의 외측에서 내측으로 접근함에 따라 이들 쇄파의 파봉으로부터 산란되는 신호강도가 점차 높아지는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 현상으로부터 쇄파가 연안의 얕은 수심으로 이동함에 따라 파봉의 높이, 즉 파고가 점차

높아지는 것으로 판단된다. 일반적으로 연안 쇄파는 파랑이 난바다에서 연안으로 가까워질 때, 수심이 점차 얕아짐으로 인해 파의 위치속도가 작아지고, 파장이 줄어들면서 파고가 증가하기 때문에 파봉이 불안정하게 되어 부서지는 현상이 나타난다 (Heiko et al., 2005). 이 때, 물에 휩쓸린 공기가 수없이 많은 기포로 변해서 흰 거품을 발생시키는데, 이 부서지는 거품의 물 입자들은 Fig. 9에서와 같이 전자파에 잘 산란되는 성질을 갖고 있어 선박용 X-band 레이더에 잘 탐지된다. 본 연구에서는 이 점에 주목하여 쇄파의 전자파 산란특성을 효과적으로 이용하여 태풍 나비의 영향으로 용호만으로 내습하는 쇄파의 동적거동을 정량적으로 모니터링하였지만, 향후에는 보다 정량적인 기법을 도입하여 해양파의 예측 및 경보시스템을 구축하기 위한 연구를 수행할 계획이다.

결론

본 연구에서는 2005년 9월 우리나라에 큰 피해를 초래한 제 14호 태풍 나비가 부산 인근을 통과할 때, 선박용 X 밴드 레이더를 이용하여 부산 용호만 연안으로 엄습하는 쇄파의 레이더 영상을 실시간으로 수록하고, 쇄파가 엄습하는 동적거동 패턴 및 파장, 또한, 연안 쇄파대에 있어서 쇄파의 생성과정을 3차원 해저 지형과 연관시켜 분석, 고찰하였다. 먼저, 쇄파의 radar image를 3차원 해저 지형도와 중첩시켜 분석한 결과, 쇄파는 레이더 안테나로부터 진방위 95.6°, 거리 2.25마일 (35° 07.874' N, 129° 09.243' E)의 급경사면의 해저 언덕 (수심 4.6m)으로부터 나타나기 시작하여 진방위 298° 방향의 남천 어촌계 방파제를 향해 내습하였다. CWT 기법에 의해 이와 같이 내습하는 쇄파의 레이더 영상신호에 대한 주파수 스펙트럼을 분석한 결과, 가장 우세한 주파수 성분은 0.9719MHz로서, 이 주파수에 대한 쇄파의 파장은 154.3m이었다. 한편, X-band 레이더 스크로프상에 매 순간마다 지시되는 레이더 영

상으로부터 쇄파대 외측 영역에 나타나는 쇄파의 파봉 사이의 간격을 EBRL 기능을 이용하여 추정 한 결과, 그 쇄파의 평균적인 파장은 약 0.085마일, 즉 157.4m이었다. 이들의 두 결과를 비교해 볼 때, 레이더의 스코프 상에서 직접 직독한 결과는 CWT에 의한 추정결과보다 3.1m 더 컸다. 이들의 결과로부터 레이더 영상을 CWT 기법에 의해 실시간으로 분석하면 쇄파의 주기, 진행방향 등을 정량적으로 모니터링할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- Heiko, D. and H. Jochen, 2005. Winf- and wave-field measurement using marine X-band radar-image sequences. *IEEE J. Ocean. Eng.* 30, 534–542.
- KMA, 2005. News data of Typhoon No. 14 Nabi on September 7. 1–3.
- Lee, D.J., 2000. Radar Navigation. Taewha publishing, Busan, pp. 83–88.
- Lee, D.J., K.S. Kim and D.S. Byun, 2002. Extraction of the ship movement information by a radar target extractor. *Bull. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 38 (3), 249–255.
- Lee, D.J., K.S. Kim, H.I. Shin and D.S. Byun, 2003a. Development of acquisition and analysis system of radar information for small inshore and coastal fishing vessels. -Position tracking and real-time monitoring-. *Bull. Kor. Soc., Fish. Tech.*, 39 (4), 337–346.
- Lee, D.J., K.S. Kim, H.I. Shin and D.S. Byun, 2003b. Development of acquisition and analysis system of radar information for small inshore and coastal fishing vessels. -Suppression of radar clutter by CFAR-. *Bull. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 39 (4), 347–357.
- MECys co., ltd., 2006. PM3D ECDIS user's manual edited by PKNU, pp. 1–50.
- Nishimoto, M. and H. Ikuno, 1997. Time-frequency analysis of scattering data using the wavelet transform. *IEICE Trans. Electron.*, E-80-C (11), 1440–1447.
- Shie, Q., 2002. Time-frequency and wavelet transforms, Prentice Hall Inc., New Jersey, pp. 99–172.

2012년 6월 11일 접수
2012년 8월 20일 1차 수정
2012년 8월 20일 수리