

# 선형회귀모델을 이용한 파랑 정보 예측 및 보정

임동희<sup>†</sup>, 김진수<sup>\*\*</sup>, 이병길<sup>\*\*\*</sup>

## Wave Information Estimation and Revision Using Linear Regression Model

Dong-hee Lim<sup>†</sup>, Jin-soo Kim<sup>\*\*</sup>, Byung-Gil Lee<sup>\*\*\*</sup>

### ABSTRACT

Conventional X-band marine radar has been used as one of the effective tools for collecting and retrieving ocean surface information parameters for three decades. Several wave information extracting algorithms have been designed in such a way that they can be utilized for efficiently estimating sea surface wave parameters such as current velocities, wave direction, significant wave heights in VTS (Vessel Traffic Service). However, their performances are still restricted. For the purpose of overcoming the performance limits, in this paper, first the conventional algorithms are analyzed and their performances are compared, and then a new control algorithm is proposed. Furthermore, we try to improve the estimation performances of typical wave parameters including wave directions and significant wave heights by introducing linear regression model in the process of computing wave information extraction. Through several simulations with the X-band radar images, it is shown that the proposed method is very effective in estimating the wave information compared to the real measured buoy data.

**Key words:** VTS(Vessel Traffic Service), Linear Regression Model, Wave Information Estimation

### 1. 서 론

최근 국내외적으로 다양한 종류의 해양 사고가 급격히 늘어나면서 해상교통관제(VTS: Vessel Traffic Service)의 필요성이 대두되고 있다. VTS란 레이더, 선박자동식별장치(AIS), 방향탐지기 등 첨단 과학 감시 장비를 이용하여 선박의 운항 상황을 관찰하고 안전 운항에 필요한 정보를 제공함으로써, 해양사고 예방 및 해양환경을 보호하고 안전하고 효율적인 해운 수송로를 확보하여 우리나라 주요항만

의 항만운영 효율성과 국제경쟁력을 높이기 위한 해상교통관제서비스를 말한다. 해양 사고가 빈번히 일어나는 이유 중 하나는 해상의 기상 이 매우 중요한 영향을 미치게 되는데, 우수한 VTS를 위해서는 해상의 기상에 대하여 신속하고 정확한 값을 제공할 필요가 있다[1]. 이를 위해 바다의 기상상태에 대한 정보를 얻기 위한 방법으로는 부이를 이용한 계측부터 인공위성을 이용한 계측까지 다양한 방법이 있지만 이 방법들은 실시간으로 획득 할 수 없으며 분실이나 파손에 노출되기 쉽고 해상상태에 대한 정보를

\* Corresponding Author : Jin-soo Kim, Address: (34014) Dongseodae-ro 125, Yuseong-gu, Daejeon, Korea, TEL : +82-42-821-1147, FAX : +82-42-821-1595, E-mail : jskim67@hanbat.ac.kr

Receipt date : Jul. 25, 2015, Approval date : Aug. 11, 2016

<sup>†</sup> Dept. of Multimedia Engineering., Hanbat National University

(E-mail : dong8066@naver.com)

<sup>\*\*</sup> Dept. of Info. & Comm. Engineering, Hanbat National University

<sup>\*\*\*</sup> ICT Convergence Security Research Team, ETRI (E-mail : bglee@etri.re.kr)

\* This work was supported by ETRI through Maritime Safety & Maritime Traffic Management R&D Program of the MPSS(Ministry of Public Safety and Security)/KIMST (2009403, Development of next generation VTS for maritime safety)

얻기 위해 많은 비용을 필요로 하는 등 다양한 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 실시간으로 수집할 수 있고 분실 될 여지가 없는 레이더를 이용한 파랑 모니터링 시스템이 제안되었고, 이는 파랑 정보 추출 알고리즘 성능을 비교 분석하여 최적의 알고리즘을 찾는 것이 중요한 연구 분야가 되어 왔다.

기존에 파랑 정보를 추출하기 위한 다양한 알고리즘이 제안되어 왔다. Young[2]은 기저파(fundamental mode wave)의 분산관계(dispersion relationship)를 사용하여 최소 자승법(Least square)을 이용해서 해류 속도를 구하는 방법이 최초로 제안하였고, 이를 바탕으로 다양한 파랑 정보를 추출하는 방법을 제시하였다. Gangeskar[3]은 Young의 방법[2]을 기반으로 가중치를 둔 최소 자승법을 이용한 알고리즘(알고리즘 A)과 알고리즘 A에 오류를 최소화 하는 방식을 추가한 알고리즘(알고리즘B) 2가지 방법을 제안하였는데, 이 방식은 Young의 방법[2]에 비해 성능이 개선되는 장점이 있지만 많은 계산량과 더불어 추가적으로 잡음 제거를 해야 하는 단점을 가지고 있다. Senet[4]은 Young[2]이 제안한 기저파 외에도 고조파(harmonics)에 대한 분산관계를 기초로 고정된 수만큼 반복적으로 갱신함으로써 해류 속도를 보정하는 방법을 제안하였다. 이 방식은 Young의 방법[2]과 Gangeskar의 방법[3]과 다르게 반복 갱신하는 과정을 포함하고 있기 때문에 보다 만족스러운 해류 속도를 얻을 수고 또한 더불어 파향 및 최대파 주기와 같은 중요 파랑 정보를 효과적으로 얻을 수 있다.

그러나 기존에 제안된 알고리즘들은 여전히 파랑 정보를 추출하는데 제한적인 정확성을 갖고 있으며, 유의 파고와 같은 파라미터를 추출하는데 제한된 성능을 보이고 있다[5-9]. 특히, 유의파고 정보를 추출하는 방법으로는 바람에 의해 잔물결이 없더라도 측정된 침두 주기와 평균주기를 통해서 유의파고를 보정할 수 있는 방법[8]과 GPS 위치 정보를 이용하여 PPP(Precise Point Positioning)기반으로 계측하는 방법[9-11] 등 다양한 방법들이 제안되었다. 하지만 이러한 방법들은 각각 다양한 환경에서 적용되지 않는 문제점과 기존의 계측 시스템과 유사하게 나타나지만 잡음을 제거하는 필터가 따로 필요로 하는 문제점 그리고 성능의 한계점을 안고 있다[12,13]. 본

논문에서는 파랑정보를 예측하는 기존의 알고리즘에 대해 분석하고, 레이더 신호를 통하여 중요 파랑 정보에 대한 예측 성능을 조사한다. 특히, 본 논문에서는 해류 속도 예측에 있어 비교적 우수한 결과를 산출하는 Senet의 방법[4]에 기초하여 잡음을 제거하고, 파랑 정보를 추출하는 알고리즘을 고안한다. 이 방식에 기초하여 1차 선형 모델과 오차 모델을 적용 보정함으로써 예측 데이터가 실제 부이데이터에 가깝도록 하는 예측 방식을 제안하고 실측치와의 비교를 통하여 제안 방식의 유효성을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 파랑 추출 알고리즘에 대해 설명하고, 3장에서 제안한 알고리즘의 전체적인 개요와 파향과 유의파고를 효과적으로 보정하는 방법을 설명한다. 그리고 4장에서는 제안한 알고리즘과 실제 부이에서 얻어온 데이터와 비교하여 성능을 평가하고 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 기존의 파랑 정보 예측 알고리즘

### 2.1 PPI(Plan Position Indicator) 이미지

레이더에서 반사 물표로부터의 신호에 의해서 생기는 불릿 즉, 레이더 표시에 있어 목표가 나타남으로써 생기는 전자빔의 편향 또는 발광 휘점을 표시로 전기, 빛, 음향 등의 진동상태를 기록하는 장치에 나타내는 지시기를 PPI라 한다. PPI로부터 불릿들인 이미지는 안테나에서 보낸 신호가 해수면에 부딪혀 되돌아오기까지 걸린 시간, 방향, 신호 크기를 나타내는 것으로 파의 주기와 높이 그리고 진행방향과 밀접한 정보를 가지고 있다. 해수면의 공간적인 정보뿐만 아니라 연속된 이미지를 얻게 되면 시간적인 정보도 얻을 수 있다[14].

### 2.2 3차원 고속 푸리에 변환(3D-FFT, 3D-Fast Fourier Transform)

푸리에 변환은 시간영역의 신호를 진폭차원과 주파수 스펙트럼을 분석할 수 있도록 주파수 영역의 신호로 변환하는 공식이다. 먼저, PPI 이미지에서 관찰하려 하는 특정 영역을 추출한 후 2D-FFT를 수행하여 특정 영역의 신호를 주파수영역으로 변환한다. 그리고 시간적인 정보를 얻어내기 위해 2D-FFT를 수행한 64장의 특정 영역의 이미지를 수집하여 시간 축에 대해 1D-FFT를 수행함으로써 주파

수별로 분리된 파수(Wave Number) 스펙트럼을 구성하게 된다. 그럼으로 인해 주파수의 특성을 찾아내어 파랑의 정보를 추출할 수 있게 된다[2].

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

3D-FFT는 식(1)과 같이 구성될 수 있다. 여기서,  $\zeta$ 는 특정 영역의 PPI 이미지 신호 크기,  $k_x, k_y$ 는  $x$  축,  $y$  축 방향의 파수 파라미터를 나타낸다.

### 2.3 해류 속도(Current Velocity)

Young의 방법[2]은 기저모드(Fundamental Mode Wave)에 대한 분산관계(Dispersion Relationship)를 사용한 최소 자승법으로 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 3D-FFT를 수행하여 구한 주파수 스펙트럼에서 에너지가 분포하는 주파수  $\omega$ 와 식(2)에서 계산되는 주파수 사이의 오차가 최소가 되는 값이 해류 속도이다[2-6].

$$\omega = \sqrt{g|k| \tanh(|k|d) + \vec{k} \vec{U}} \quad (2)$$

여기서  $\vec{k}=(k_x, k_y)$ 는 파수 벡터,  $g$ 는 중력가속도,  $d$ 는 수심 깊이,  $\vec{U}$ 는 해류 벡터를 나타낸다.

Gangeskar의 방법[3]은 기존의 Young의 방법[2]을 기초로 하여 추가적으로 스펙트럼( $F$ )값을 곱하여 가중치를 달리 줌으로써, 식(3)으로 해류 파라미터  $U_x, U_y$ 을 계산할 수 있다.  $U_x, U_y$ 에 대해 최소 자승법을 적용하여 최솟값을 갖기 위한 조건식은 식(4)로 나타낼 수 있다[3].

$$\begin{pmatrix} U_x \\ U_y \end{pmatrix} = \frac{1}{(\sum F k_x^2)(\sum F k_y^2)} \begin{pmatrix} \sum F k_y^2 & \sum F k_x k_y \\ \sum F k_x k_y & \sum F k_x^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sum F(\omega - \omega_0) k_x \\ \sum F(\omega - \omega_0) k_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\Delta\omega = \omega_i - \sqrt{g|k| \tanh(|k|d) - k_x U_x - k_y U_y} \quad (4)$$

$$\omega_0 = \sqrt{g|k| \tanh(|k|d)} \quad (5)$$

여기서  $F$ 는 레이더 이미지를 3D-FFT 수행하여 얻어진 레이더 이미지의 스펙트럼 값이고,  $\omega_0$ 는 분산관계에 의한 기본 주파수이다.

이상의 결과에서 확장하여 Senet의 방법[4]은 2단계로 나눌 수 있다. 1단계는 Young의 방법[2]으로 초기 해류 속도 값을 구한다. 이렇게 구한 초기 해류 속도는 샘플링 속도가 낮거나 해류 속도가 높을 경우 어떠한 점에서 에일리어싱(aliasing)이 발생하여 매우 불안정하기 때문에 2단계를 수행해야 한다. 2

단계는 1단계에서 산출된 해류 속도를 이용하여 저저 및 고조파 모드(harmonics mode)의 분산관계식을 기반으로 임계값보다 높은 에너지를 갖는 스펙트럼을 구분함으로써 반복적으로 갱신하여 보정한다. 따라서 식(6)에서는 반복 변수  $p$ 의 값에 따라 반복적으로 보정된 공간주파수  $\omega_p(k_x, k_y)$ 와 기본 분산관계 사이의 오차가 최소가 되는 값이 해류 속도가 된다[12,13]. 고정된 반복횟수는 해류 속도를 갱신하는데 사용되며, 실제로 만족스러운 해류속도는 경우에 따라서 10번 이상의 반복이 필요할 수 있기 때문에 식(8)과 같이 적응적인 종료 기준을 선택한다.

$$\omega_p = \pm(p+1) \sqrt{\frac{gk}{p+1}} + \vec{k} \vec{U} \quad (6)$$

$$E = \sum_{i=1}^{N_s} [\omega_i - \omega_p(k_{x_i}, k_{y_i}) - k_{x_i} U_x - k_{y_i} U_y]^2 \quad (7)$$

$$|U_{x_n} - U_{x_{(n-1)}}| < 0.05m/s \text{ and } |U_{y_n} - U_{y_{(n-1)}}| < 0.05m/s \quad (8)$$

### 2.4 분산관계식(Dispersion Relationship)

파수 스펙트럼은 파랑성분의 에너지뿐만 아니라 음영효과(Shadow effect), 육지, 선박에 의해 발생하는 잡음성분도 포함되어 있다. 따라서 해류속도를 포함한 분산관계식을 이용하여 대역 통과 필터링(Band-pass filtering)을 수행하여 특정 범위의 주파수에 벗어나는 신호를 제거함으로써 파수 스펙트럼을 재구성한다.

### 2.5 방향 파 스펙트럼(Directional Wave Spectrum)

레이더 PPI 이미지를 3D-FFT를 수행하게 되면, 파수 스펙트럼을 구성할 수 있으나 이는 양의 주파수영역과 음의 주파수영역이 공존하기 때문에 방향의 모호성이 존재하게 된다. 따라서 방향의 모호성을 극복하기 위해서 식(9)와 같이 3D-FFT를 수행한 파수 스펙트럼의 양의 주파수만을 적분하여 방향 파 스펙트럼을 구성한다[12,13].

$$F(k_x, k_y) = 2 \int_{\omega > 0} F(k_x, k_y, \omega) d\omega \quad (9)$$

### 2.6 유의 파고(Significant Wave Height)

유의파고는 임의 시간동안 발생하는 파도 중 파고가 높은 순서로 정렬할 때, 상위 30%에 해당하는 파고들의 평균파고를 의미한다. 식(10)과 같이 야코

비안 행렬(Jacobian Matrix)식을 이용하여 방향파 스펙트럼의  $k_x, k_y$  직교 도메인을 주파수와 각도 즉,  $f, \theta$ 와 같은 극 도메인으로 좌표 변환하고, Gomen의 방법[15]으로 식(11)과 같이 0차 원점 모멘트를 사용하여 유의파고를 산출한다.

$$F(f, \theta) = \frac{\alpha(k_x, k_y)}{\alpha(f, \theta)} F(k_x, k_y) = \frac{4\pi(\omega)^3}{g^2} F(k_x, k_y) \quad (10)$$

$$H_s = 4\sqrt{\iint F(f, \theta) df d\theta} \quad (11)$$

2.7 연 엔지니어링의 유의파고 보정 방법[8]

기존에 제안된 연 엔지니어링의 방법[8]은 유의파고와 첨두주기(Peak Period), 평균주기(Mean Period) 사이의 상관관계를 분석하여 다음과 같은 수식적 모델을 적용함으로써 브래그 산란현상으로 인해 잘 예측이 되지 않는 유의파고( $H_s$ )들을 보정하여 예측하는 방법이 제안되었다. 여기서 첨두주기( $T_p$ )는 파랑 스펙트럼에서 에너지가 가장 큰 파고의 주기를 나타내고, 평균주기( $T_m$ )는 여러 성분의 파랑의 주기들의 평균 파주기를 말한다.

$$T_m = 0.8203 T_p + 0.2678 \quad (12)$$

$$H_s = 0.8497 T_m - 4.997 \quad (13)$$

$$H_s = 0.6970 T_p - 4.7695 \quad (14)$$

3. 제어 알고리즘과 선형회귀모델

3.1 제안하는 알고리즘의 제어 흐름도 요약

본 논문에서는 우선 기존에 제안된 파랑 추출 알고리즘을 통해 파도의 해류속도, 방향, 높이 등 파랑 정보를 추출하고 비교분석한다. 또한, 선형모델과 오차모델을 구성함으로써 효과적인 파랑 추출 알고리즘을 설계한다. Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 파랑 정보 예측 알고리즘의 전체적인 제어 흐름도를 나타낸다.

먼저, 레이더의 PPI 프레임 이미지는 3초 단위로 입력되며 3D-FFT를 위해 64장이 모여, 분석하고자 하는 특정 영역에 대해 수집된 이미지를 3D-FFT 즉, 주파수영역의 신호로 변환하는 과정을 거친다. 그리고 파랑성분 외의 잡음을 제거하기 위해 유체학적으로 증명된 분산 관계식에 가장 효과적인 해류 산출 알고리즘인 Senet의 방법[4]을 적용하여

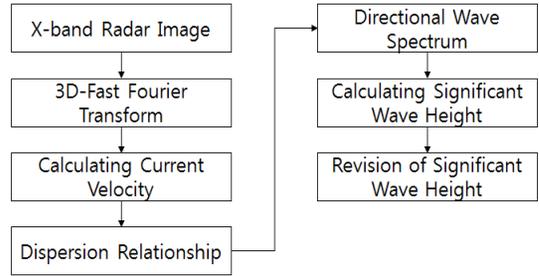


Fig. 1. Control flow of the proposed wave information estimation algorithm.

대역 통과 필터링(Band Pass Filtering)을 수행한다. 잡음이 제거된 파수 스펙트럼의 방향 모호성을 극복하기 위해 양의 주파수 영역만을 다루어 방향파 스펙트럼을 도출한다. 이상의 과정을 통해 얻은 방향파 스펙트럼을 이용하여 파향과 해류속도를 산출하고, 유의파고를 산출하기 위해 야코비안 행렬식을 이용하여 파고 스펙트럼으로 변환한다. 이후, 실제 부이데이터와 비교분석하여 선형적 모델과 오차모델을 통해 구성된 자동회귀모델을 통해 효과적으로 파랑 정보를 추출한다.

3.2 제안하는 보정 알고리즘

가장 중요한 파랑 정보 파라미터 중의 하나인 파향 값을 예측하기 위해서는 먼저 해류 속도를 산출해야 한다. 본 논문에서는 Fig. 1에서 나타낸 제안된 알고리즘에서 해류속도(current velocity)를 예측하기 위해서는 Young의 방법[2], Gangeskar의 방법[3], Senet의 방법[4] 세 가지 방법을 사용하여 성능을 모의실험으로 평가하였다. 모의실험은 2015년 7월 23일과 24일 이틀간에 획득된 레이더 데이터에 대해 수행하였으며, 그 성능은 실측치 데이터와의 비교를 통하여 이루어졌다. 모의실험 결과는 Fig. 2에 나타내었는데, (a)의 결과는 Young의 방법[2]은 실측치 즉 부이(buoy) 데이터에 비해 매우 큰 오차를 나타나고 있다. 7월 24일의 낮은 해류 속도에서 매우 불안정하고, 부정확한 결과를 낳고 있음을 확인할 수 있다. 반면에 Gangeskar의 방법[3]은 Young의 방법[2]에서 이미지 스펙트럼 값으로 가중처리를 추가함으로써 보정하였는데 약 2cm/s의 평균오차가 나타난다. Senet의 방법[4]은 초기 해류 속도를 산출한 후 고정 임계값까지 반복 갱신함으로써 최적

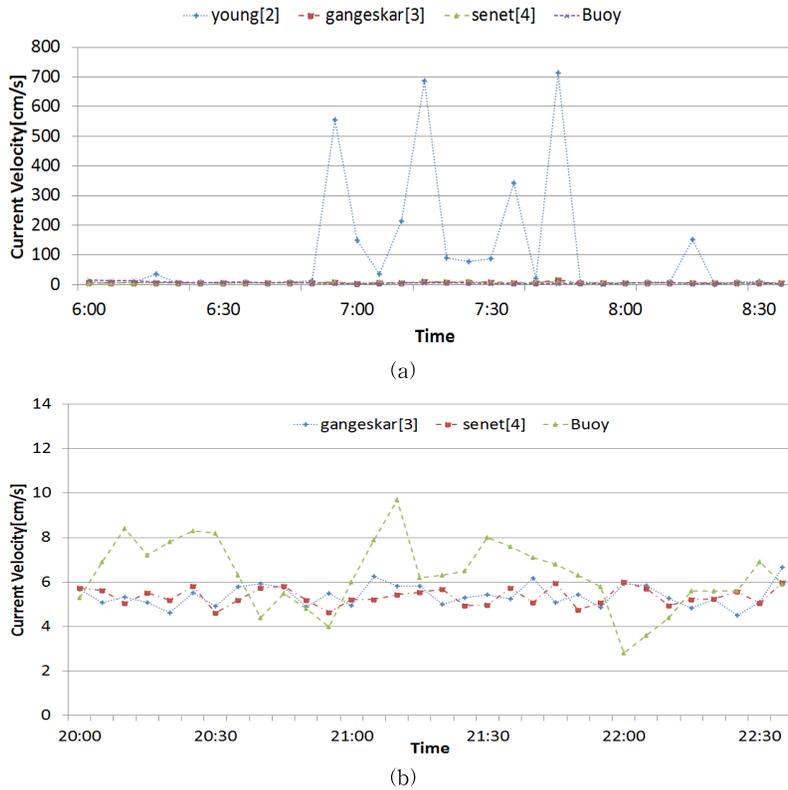


Fig. 2. Comparison of estimated current velocities, (a) 2015.07.24, 06:00~08:40 (b) 2015.07.23, 20:00~22:40.

의 해류 속도를 산출하고 약 1.3cm/s의 평균오차를 줄일 수 있게 된다. Fig. 2(b)는 7월 23일의 데이터에 대해 Young의 방법[2]을 제외한 두 가지의 방법만을 비교분석하여 나타낸 것이다. 이 결과에서 알 수 있듯이 Senet의 방법[4]이 실측치(buoy) 데이터 가장 정확한 결과를 도출하게 됨을 알 수 있다.

이상의 결과를 바탕으로 Senet의 방법[4]에 의해 예측된 파향을 예측하는 값과 실측치와의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 전체적으로 Senet의 방법[2]은 실측치에 매우 유사한 결과를 나타내는 특성을 보인다. 이 관계는 선형적인 관계를 나타냄을 볼 수 있는데, 본 논문에서는 이러한 선형관계를 모델화한다. 일반적으로 선형관계는 일정한 증가 또는 감소 비율을 보여주는 선으로써, 데이터의 추세 선을 나타낸다. 즉, 독립변수에 따라 종속변수의 값이 일정한 패턴으로 변해 가는데, 이러한 변수간의 관계를 나타내는 회귀선이 1차 함수의 직선에 가깝게 나타나는 경우를 선형회귀분석(Linear Regression Analysis) [7]이라고 하며 실례에서 가장 기본적으로 사용되고

있는 통계학적 모델링 방법이다.

본 논문에서 제안하는 방법은 다음과 같이 두 개의 단계를 거쳐서 예측된 파랑정보를 보정하는 방법을 고안한다.

첫 번째, 기존의 파랑 추출 알고리즘을 통해 예측된 파향 또는 파고와 실제 부이에 설치된 센서를 통해 얻어진 파향 또는 파고와의 오차율을 분석하여  $n$ 차 회귀분석을 구성하고 예측 파랑정보에 적용하여 보정한다. 여기서는 1차 선형회귀분석을 사용하는데, 예측된 파랑정보와 실측된 파랑정보의 차이가 크지 않고 두 변수의 변화가 비례적이기 때문에 단순선형모델로 구성한다.

두 번째, 현재 파랑정보와 이전 파랑정보의 오차 모델을 구성하고 첫 번째 보정된 파랑정보에 적용함으로써 한 번 더 보정을 수행한다.

Fig. 3에서는 Fig. 2에서 나타낸 상대적으로 우수한 해류 속도를 산출하는 Senet의 방법[4]을 Fig. 1에 나타낸 제안된 제어 알고리즘에 적용하여 예측한 파향과 실측치 사이의 관계를 나타낸다. 제안된 알

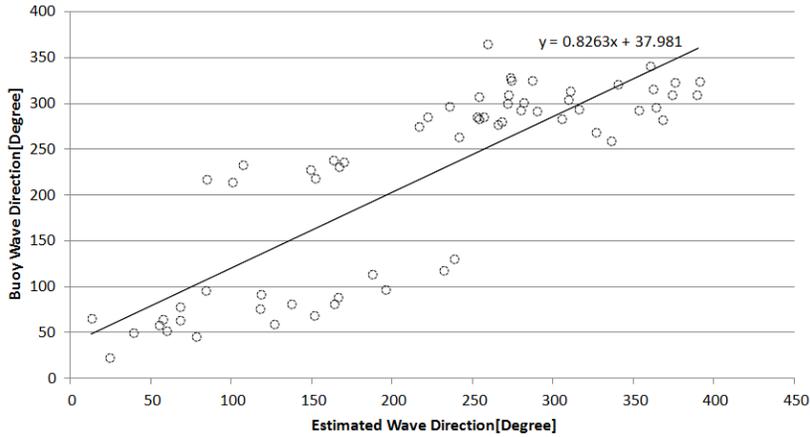


Fig. 3. Linear regression model between estimated wave direction and buoy data.

고리즘에 의한 예측 결과는 실측된 파향과 예측된 파향이 비례하게 나타나는데, 1차 선형 식에 근접하여 분포하고 오차가 균일하게 나타나기 때문에 다음 식과 같은 1차 선형모델을 구성한다.

$$y = 0.8263x + 37.981 \tag{15}$$

식(15)에서  $x$ 는 Senet의 방법[4]으로 산출된 해류 속도가 이용된 분산관계식을 적용하여 예측 파향을 나타내고,  $y$ 는 Fig. 3에서 구성한 선형모델 식을 적용함으로써 보정한 예측 파향을 나타낸다.

파향과 유의파고는 바다의 특성 중 태풍과 같은 자연재해가 발생하지 않는 상태일 때 바다상태는 시간이 지날수록 급변하지 않고 서서히 변화하는 특성 즉 정제적인 신호 (stationary signal) 특성을 가지고 있기 때문에 이전 파랑 정보를 고려하여 변화오차 모델을 구성할 수 있다. 따라서 현재 예측된 파랑정보와 이전 예측된 파랑정보의 변화 오차를 고려하여 오차모델(Error Model)을 구성하고 선형모델로 인해 예측된 파랑정보에 한 번 더 적용함으로써 성능을 개선하기 위해 통계적인 특성에 기초하여 다음과 같은 보정을 수행한다.

$$\epsilon(n) = \frac{1}{\delta} E_p(n)\sigma \tag{16}$$

$$\begin{aligned} E_p(n) &= Hs_p(n) - Hs_p(n-1), \\ E_r(n) &= Hs_r(n) - Hs_r(n-1) \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (E_p(n) - \bar{E}_p)^2}, \\ \sigma &= \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (E_r(n) - \bar{E}_r)^2} \end{aligned} \tag{18}$$

식(17)에서  $Hs_p(n)$ 은  $n$ 시각에서 Gomen의 방법 [15]으로 산출된 유의파고와 부이에서 수집한 실측 유의파고들의 선형모델로서 보정된 예측 유의파고를 의미하고,  $Hs_r$ 은 실제 부이에서 수집한 예측 유의파고를, 그리고  $E_p$ 과  $E_r$ 는 각각 현재 예측 유의파고와 이전 예측 유의파고의 오차, 현재 실측 유의파고와 이전 실측 유의파고의 오차를 의미한다.

식(18)에서  $\delta$ 는 예측된 유의파고의 오차와 오차들의 평균제곱오차를 구한 것으로서 예측 유의파고 오차들의 표준편차를 의미하고,  $\sigma$ 는 실측 유의파고 오차들의 표준편차를 의미한다. 위에서 얻어진 표준편차는 식(16)와 같이 현재 예측 유의파고의 오차 ( $E$ )에 가중 파라미터로서 사용되고 그렇게 재구성된 오차( $\epsilon$ )를 예측된 유의파고에 적용함으로써 보정이 수행된다.

## 4. 모의실험 및 검토

### 4.1 실험환경

본 논문에서 사용된 레이더는 부산 용호동 용호 부두에 설치되어 있고, 그리고, 예측치와 비교를 위한 실측치를 얻기 위한 부이(buoy)는 부산 해운대 해수욕장 근해에 설치되어 있다. 레이더로부터 입력되는 PPI 이미지를 통해 본 논문에서 제안된 알고리즘을 통해 파랑 정보를 예측하게 되고, 그 결과는 국립해양조사원[14]을 통해서 수집하였다. 실험시간은 레이더 영상을 수집한 시간에 따라서 2015년 07월 23일 8:00pm에서 10:40pm까지, 2015년 07월 24일

06:00am에서 08:40am까지로 5분단위로 실측된 데이터를 수집하여 모델을 구성하였고, 2015년 11월 27일 16:15pm에서 16:50pm까지의 파랑정보에 적용함으로써 제안하는 모델의 유효성을 검증하였다.

#### 4.2 모의실험 결과

##### 4.2.1 파향 예측 결과

Fig. 4에서는 기존의 Senet의 방법[4]으로 산출된 해류속도를 적용하여 예측한 파향과 Fig. 3에서 구성한 선형모델을 적용하여 보정한 예측 파향, 식(14)로 구한 오차모델을 적용하여 한 번 더 보정한 예측 파향을 비교한 것이다. Senet의 방법[4]으로 산출된 해류 속도를 적용하여 예측한 파향은 약 26°의 평균 오차가 나타났고, 실제 파향과의 선형회귀분석을 통해 보정된 파향은 약 20°의 평균오차, 제안하는 AR model을 통해 보정된 파향은 약 17°의 평균오차로 가장 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 즉, 기존의 방법보다 제안하는 방법이 약 10°의 오차가 보정되는 것을 확인할 수 있었다.

##### 4.2.2 유의파고 예측 결과

Fig. 5는 Gomen의 방법[15]으로 예측한 유의파고와 연 엔지니어링의 방법[8]을 사용하여 예측한 유의파고, 제안하는 방법으로 예측한 유의파고를 비교하였다. 그 결과에서 볼 수 있듯이 기존의 연 엔지니어링의 방법[8]같은 경우, 평균오차가 약 0.55m/s로 차이가 많이 나타나는 것을 확인하였고, Gomen의

방법[15]으로 구했을 때는 약 0.26m/s 차이가 나타나는 것을 확인하였다. 제안하는 방법을 이용한 유의파고는 약 0.1m/s의 평균오차로 Gomen의 방법[15]보다 우수하게 보정됨을 알 수 있으며, 더불어 연 엔지니어링의 방법[8]과의 비교에서도 성능이 우수하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안한 알고리즘은 파고 예측에 있어 더욱 안정적인 성능을 예측한데 더욱 효과적임을 확인할 수 있었다.

### 5. 결 론

최근에 큰 해양 사고가 빈번히 발생함에 따라 해상교통관제를 통해 항해의 안정성과 더불어 효율성을 개선하기 위해, 본 논문에서는 VTS 센서를 이용한 3D 영상 분석에 기초한 파랑정보 예측 알고리즘에 대한 성능을 비교 분석하였고 더불어 선형회귀모델을 도입하여 파랑 정보 예측 및 보정 알고리즘을 제안하였다. 먼저, 제안된 알고리즘은 파향을 구하는 과정에서 각각 해류를 산출하는 알고리즘들을 적용하여 예측한 파향과 실제 수집된 파향과 비교하고, 유의파고는 초기에 제안된 Gomen의 방법과 파주기와의 상관관계를 고려하여 기존에 제안된 연 엔지니어링의 방법과의 성능을 비교하였다. 하지만 Gomen의 방법은 오차가 커서 정밀도가 떨어지는 문제점을 가지고 있고, 연 엔지니어링의 방법은 실험환경에 따라 모델이 성능이 크게 달라지기 때문에 효과적인 성능을 기대할 수 없었다.

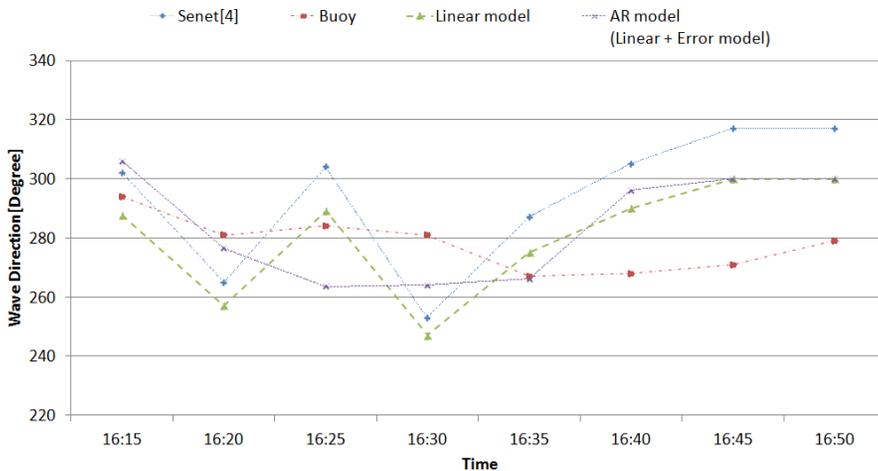


Fig. 4. Performance comparison of estimated wave direction (2015.11.27, 16:15~16:50).

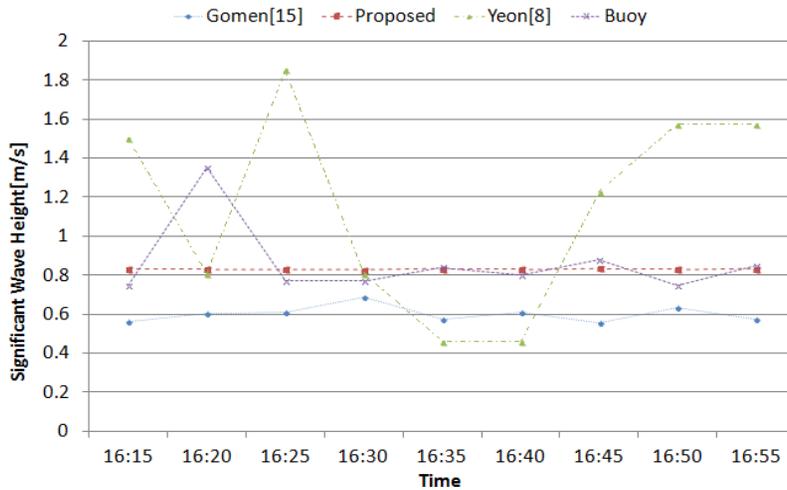


Fig. 5. Performance comparison of estimated significant wave height (2015.11.27, 16:15~16:50).

본 논문에서는 Senet의 방법을 이용하여 해류 속도를 산출하였고, 파랑 정보 예측 알고리즘의 파향, 유의파고를 산출하는 과정에서 실제 부이데이터와 비교분석하여 얻어진 선형모델과 오차모델을 구성함으로써 자동회귀분석을 통해 파랑 정보를 보다 효과적으로 보정하는 방법을 제안하였다. 제안하는 방법으로 보정된 파랑 정보들은 기존 알고리즘과 비교했을 때, 파향 같은 경우에는 평균 10°의 오차가 보정되는 효과를 얻을 수 있었고, 유의파고 같은 경우에는 환경에 따라 적용되는 연 엔지니어링의 방법과 달리 다양한 데이터를 통해 선형모델을 구성함으로써 다른 환경에 적용했을 때도 보정효과가 개선되어 나타나는 것을 확인하였다. 또한 오차모델을 구성하여 한 번 더 보정함으로써 실제 부이 데이터와 약 0.1m/s의 평균오차로 가장 유사하게 나타나는 것을 확인하였으며, 이를 통해 파고 예측에 있어 더욱 효과적임을 확인하였다. 앞으로 파고가 3m 이상의 거친 바다상태일 때 추가적인 실험을 통해 제안된 알고리즘에 대한 안정화 연구를 수행할 필요가 있다.

## REFERENCE

- [ 1 ] B. Jang, K. Lee, D. Lee, S. Lim, and K. Kwon, "Study about Real-time Total Monitoring Technique for Various Kinds of Multi Weather Radar Data," *Journal of Korea Multimedia*, Vol. 19, No. 4, pp. 689-705, 2016.
- [ 2 ] I.R. Young, W. Rosenthal, and F. Ziemer, "A Three-dimensional Analysis of Marine Radar Images for the Determination of Ocean Wave Directionality and Surface Current," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No. C1, pp. 1049-1059, 1985.
- [ 3 ] R. Gangeskar, "Ocean Current Estimated From X-Band Radar Sea Surface Images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 4, pp. 783-792, 2002.
- [ 4 ] C.M. Senet, J. Seemann, and F. Ziemer, "The Near Surface Current Velocity Determined from Image Sequences of the Sea Surface," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 3, pp. 492-505, 2001.
- [ 5 ] F. Serafino, C. Lugni, and F. Soldovieri, "A Novel Strategy for the Surface Current Determination from Marine X-Band Radar Data," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 7, No. 2, pp. 231-235, 2010.
- [ 6 ] W. Huang and E. Gill, "Simulation Analysis of Sea Surface Current Extraction from Microwave Nautical Radar Images," *Proceeding of The IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 2673-2676,

2012.

[7] G.A.F Seber and A.J. Lee, *Linear Regression Analysis*, John Wiley & Sons Publishers, USA, 2012.

[8] Yeon Engineering Co., Ltd., *Correction Method of The Significant Wave Height from Images of X-Band Nautical Radar System*, Patent Number 10-0950301, Korea, 2010.

[9] Samsung Heavy Industries Co., Ltd., *Wave Monitoring System Using Radar*, Patent Number 10-0795797, Korea, 2008.

[10] K. Reichert, K. Hessner, J.C. Nieto Borge, and J. Dittmer, "WAMOS II: A Radar Based Wave and Current Monitoring System," *Proceeding of The Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 1-5, 1999.

[11] S. Song, D. Cho, and S. Pack, "Development of Wave Monitoring System Using Precise Point Positioning," *Journal of The Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 1055-1062, 2015.

[12] J. Kim and B. Lee, "Wave Information Retrieval Algorithm Based on Iterative Refinement," *Journal of the Korea Industrial Information System Society*, Vol. 21, No. 1, pp. 7-15, 2016.

[13] J.S. Ryu, D.H. Lim, J.S. Kim, and B.G. Lee, "Performance Comparison of Wave Information Retrieval Algorithms Based on 3D Image Analysis Using VTS Sensor," *Journal of The Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 519-526, 2016.

[14] The Buoy Measurement Data, <http://www.khoa.go.kr/>, (accessed July., 10, 2016).

[15] G.J. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P.A.E.M. Janssen, *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge University Press Publishers, New York, 1994.



임 동 희

2008년~2015년 한밭대학교 멀티미디어공학과 졸업 (학사)  
 2015년~현재 한밭대학교 정보통신전문대학원 석사과정  
 관심분야: 영상처리, 영상해석, 알고리즘



김 진 수

1998년 KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사  
 1995년~2000년 삼성전자 선임연구원  
 2000년~현재 한밭대학교 정보통신공학과 교수

2003년~2006년 한국전자통신연구원 초빙연구원  
 2008년~2009년 텍사스 주립대학교 (UTA) 교환교수  
 관심분야: 영상처리, Distributed Video Coding, 압축센싱, 영상부호화, 영상통신



이 병 길

2003년 경북대학교 전자공학과 공학박사  
 1993년~2001년 테이콤종합연구소 선임연구원  
 2001년~현재 한국전자통신연구원 책임연구원

관심분야: Security and Safety 기술, Cyber Security, VTS/e-Navigation