

동해안 너울성 고파 예측 알고리즘

안석진* · 이병욱** · 권석재*** · 이창훈****

Ahn, Suk Jin* · Lee, Byeong Wook** · Kwon, Seok Jae*** · Lee, Changhoon****

Algorithm of Predicting Swell-like Significant Waves in the East Coast of Korea

ABSTRACT

In this study, we develop an algorithm to predict swell-like significant waves in the east coast of Korea using the directional wave gauge which is installed near Sokcho. Using the numerical wave model SWAN, we estimate wave data in open sea from the wave data observed through the directional wave gauge. Then, using the wave ray method with the open-sea wave data as offshore boundary conditions, we predict the swell-like significant waves at several points in the east coast of Korea. We verify the prediction methods with the SWAN and wave ray methods by comparing numerically predicted data against either target or measured data at the observation site. We can improve the prediction of the swell-like significant waves in the east sea of Korea using both the real-time wave measurement system and the present prediction algorithm.

Key words : East Sea swell-like significant wave, Wave prediction algorithm, SWAN, Wave ray approach

초록

본 연구에서는 속초 인근에 설치된 파향·파고계로 관측되는 파랑 자료를 이용하여 동해안 주요지역에 너울성 고파를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. SWAN 모형을 이용하여 연안의 파랑 관측 자료로부터 고파 발생지로 추정되는 외해지점의 파랑 제원을 추정하였다. 그리고, 추정된 파랑 제원을 경계조건으로 하여 파향선 추적법을 사용하여 동해안 주요 지점의 너울성 고파를 예측하였다. 관측지점에서 SWAN 모형과 파향선 추적법에서 예측되는 파랑 제원을 가상의 설정값 또는 관측값과 비교하여 예측알고리즘의 정확성을 검증하였다. 동해안 실시간 파랑관측 시스템과 본 연구결과를 활용하면 동해안 너울성 고파의 예측을 향상시킬 수 있다.

검색어 : 동해안 너울성 고파, 파랑 예측 알고리즘, SWAN, 파향선 추적법

1. 서론

최근 몇 년간 우리나라 동해안에서는 동계 너울성 고파에 의한 인명 및 재산피해가 심각한 사회적 문제로 대두되고 있다. 너울성 고파는 중국 내륙 및 우리나라 부근에서 강하게 발달한 온대성 저기압이 동해로 진출하여 강한 바람과 함께 생성된 폭풍파가 동해안까지 내습하여 발생하는 것으로 알려져 있다(Jeong et al., 2007; Jeong et al., 2008). 너울성 고파의 침투주기는 9초 이상의 장주기여서 통상적인 풍파에 비해 에너지의 감쇠가 적으면서 장거리를 이동한다. 너울성 고파가 위험한 이유는 고파가 해안에 도달할 당시 바람이 심하게

* 정회원 · (주)지오시스템리서치 차장 (sjahn@geosr.com)

** 세종대학교 건설환경공학과 박사과정 (byeongwook@sju.ac.kr)

*** 정회원 · 교신저자 · 국립해양조사원 해양과학조사연구실 연구관

(Corresponding Author · Korea Hydrographic and Oceanographic Administration · sj79kwon@korea.kr)

**** 정회원 · 세종대학교 건설환경공학과 교수 (clee@sejong.ac.kr)

Received July 2, 2013/ revised August 21, 2013/ accepted October 1, 2013

불지 않아 방심한 사이 갑자기 큰 파도가 덮쳐서 인명 및 재산피해가 크게 발생하기 때문이다. 2005년 이후 동해안 너울성 고파의 내습으로 인하여 해상 및 해안에서 사망실종된 사람이 약 60여명에 달하며, 재산 피해 규모는 연평균 백억원을 상회한다(Jeong and Oh, 2009).

동해안 너울성 고파 발생에 관해서는 이미 오래 전부터 인식되어 왔으며(Goda and An, 1973), 최근 너울성 고파에 의한 인명 및 재산피해가 급증함에 따라 관련 연구가 활발하게 수행되고 있다. Oh 등(2010)은 관측자료를 이용하여 너울성 고파의 특성을 분석하였으며, 너울성 고파의 발생역을 추정하는 방법을 제안하였다.

너울성 고파로 인한 피해를 저감시키기 위해서는 연안에서 파고, 주기 및 파향을 상시 관측하는 시스템을 설치하여 관측자료를 축적하고, 축적된 관측자료를 이용하여 검증된 너울성 고파 예측 모델링이 필요하다. 국립해양조사원에서는 실시간 해양관측정보 시스템(KODAS)을 통해 속초 동방등표 인근 수심 18m 지점에서 AWAC 관측장비를 설치하여 2012년 12월부터 유의파고, 침두주기, 침두파향, 유속 뿐만 아니라 주파수 스펙트럼과 방향스펙트럼을 실시간으로 관측하여 20분 단위로 전송하고 있다. AWAC은 Nortek 회사의 초음파식 파향파고계로서 파랑 제원을 1초 단위로 관측한다.

너울성 고파는 통상적으로 우리나라 동해안 북동측 해역에서 생성되어 전파한다. 따라서 우리나라 동해안 북측에 가장 먼저 도달하며, 시간차를 가지고 동해안 전역으로 전파한다. 본 연구에서는 우리나라 동해안 북측의 속초에서 너울성 고파를 관측하여 동해안 주요 지점에서 너울성 고파의 유의파고, 침두주기, 침두파향, 도달시간을 예측하는 알고리즘을 개발하였다(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, 2012). 즉, 속초에서 실시간으로 관측한 파랑 자료로부터 너울성고파를 감지하면 SWAN (Booij 등, 1999) 수치모형을 사용하여 심해너울성 고파를 추정하고, WAVE RAY 수치모형(파향선 추적법 사용)을 사용하여 동해안 주요지점의 너울성 고파를 예측한 뒤 이를 검증·보완한다(Fig. 1 참조). 제2장에 SWAN (Booij et al., 1999) 모형 결과를 상관성 분석하여 연안 관측치로부터 외해 너울성 고파를 역으로 추정하는 방법을

제시하였다. 제3장에 파향선 추적법을 이용하여 동해안 주요 지점에서 너울성 고파를 실시간 예측하는 방법을 제시하였다. 제4장에서 속초의 AWAC 관측자료를 활용하여 본 연구의 예측 알고리즘을 적용하였다. 제5장에 연구내용을 정리하고, 향후 연구과제를 제시하였다.

2. 외해 너울성 고파 추정

너울성 고파 발생 유무를 판단하기 위한 파랑 관측 지점은 파랑의 굴절, 천수, 반사, 회절, 쇄파 등의 영향이 없는 심해에서 수행되어야 하지만 대부분의 파랑관측은 관측장비의 해상도의 한계, 기기 보수 및 유실 등의 문제로 연안에서 수행되고 있다. 연안에서 관측된 너울성 고파를 다른 지역의 너울성 고파 예측에 이용하게 되면 파고, 파향 등의 계산에 큰 오차가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 모델 영역을 심해까지 확장하고, 파랑의 굴절, 천수, 반사, 회절, 쇄파, 비선형 현상 등을 고려한 다방향 불규칙파 전파모형인 SWAN을 이용하여 다양한 심해 파랑 조건에서 관측지점의 결과를 도출하여, 유의파고, 주 파향, 침두신장인자의 심해와 관측지점 간의 상관관계를 찾았다. 이 관계를 이용하여 관측지점에서의 파랑 제원으로부터 너울성 고파 발생지점의 파랑제원을 역으로 추정하였다.

2.1 파랑변형 수치실험

파랑변형을 예측하는 수치모형으로 SWAN (Booij et al., 1999)을 사용하였다. SWAN (Simulating WAve Nearshore)은 네덜란드 Delft 공대에서 개발한 소위 3세대 파랑변형 수치모형으로 파랑에너지의 천수, 굴절, 회절, 흐름에 영향, 바람에 의한 에너지 생성, 백파(white capping), 쇄파 등에 의한 에너지감쇠, 파랑간의 4차 비선형 현상, 바닥의 마찰 등을 모의할 수 있다. 지배방정식으로 다음과 같은 파작용 평형방정식(wave action balance equation)을 사용한다(Hasselmann et al., 1973).

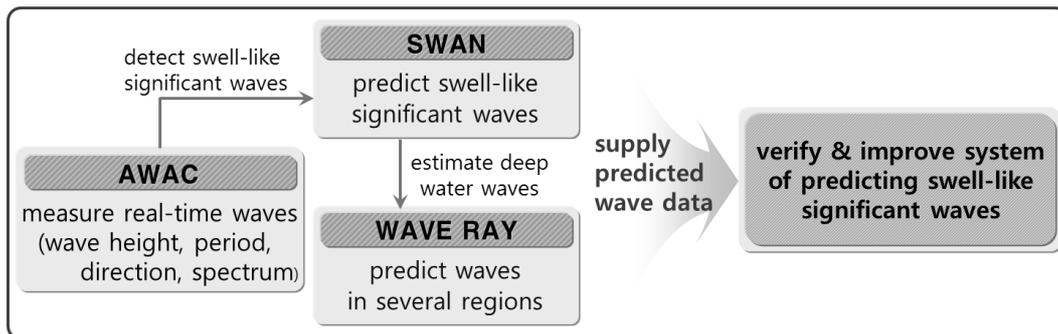


Fig. 1. Algorithm of Predicting Swell-Like Significant Waves

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(C_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(C_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(C_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(C_\theta N) = \frac{s}{\sigma} \quad (1)$$

위 식에서 $N = S(f, \theta) / \sigma$ 은 파작용밀도이고, $S(f, \theta)$ 는 방향스펙트럼밀도이고, $\sigma = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U}$ 는 흐름의 속도 \vec{U} 로 움직이는 좌표에서의 각주파수이고, $C_x, C_y, C_\sigma, C_\theta$ 는 각각 x, y, σ, θ 공간에서의 위상속도이고, s 는 파작용밀도의 생성, 소멸, 파랑간의 상호작용에 따른 원천항이다.

관측장비 설치위치는 속초 인근 동방등표에서 남동측으로 약 50m 이격된 지점으로 관측수심은 약 D.L.(-)18.0m이다. 파랑변형 실험은 외해측 경계가 심해조건이 되도록 속초항을 중심으로 25km × 31km 영역에 대해 최소 격자간격 20m의 가변격자를 구성하여 수행하였다. 계산영역의 경계에 심해파 조건으로 다음과 같은 방향스펙트럼을 사용하였다.

$$S(f, \theta) = S(f) G(f, \theta) \quad (2)$$

위 식에서 $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼으로 본 연구에서 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였다. JONSWAP 스펙트럼은 유의파고 H_s , 첨두주기 T_p , 첨두신장인자 γ 를 매개변수로 하여 다음과 같이 표현된다.

$$S(f) = \beta_J H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25 (T_p f)^{-4}] \gamma \exp\left[-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

여기서

$$\beta_J = \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} (1.094 - 0.01915 \ln \gamma) \quad (4)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07: f \leq f_p \\ 0.09: f \geq f_p \end{cases} \quad (5)$$

$$\gamma = 1 \sim 7 \text{ (mean of 3.3)} \quad (6)$$

Eq. (2)에서 $G(f, \theta)$ 는 방향분산함수로서 다음과 같이 표현되는 Mitsuyasu et al.(1975)의 것을 사용하였다.

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_p}{2} \right) \quad (7)$$

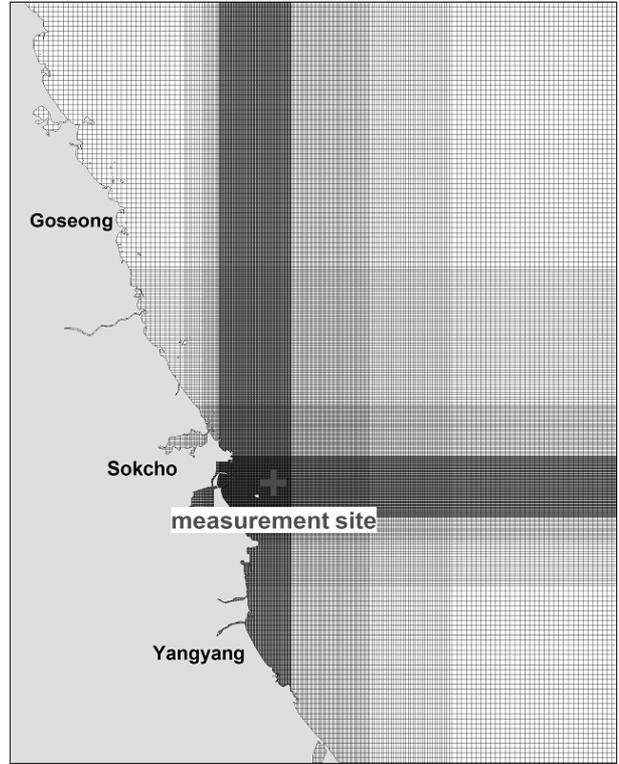


Fig. 2. Meshes for Numerical Experiment

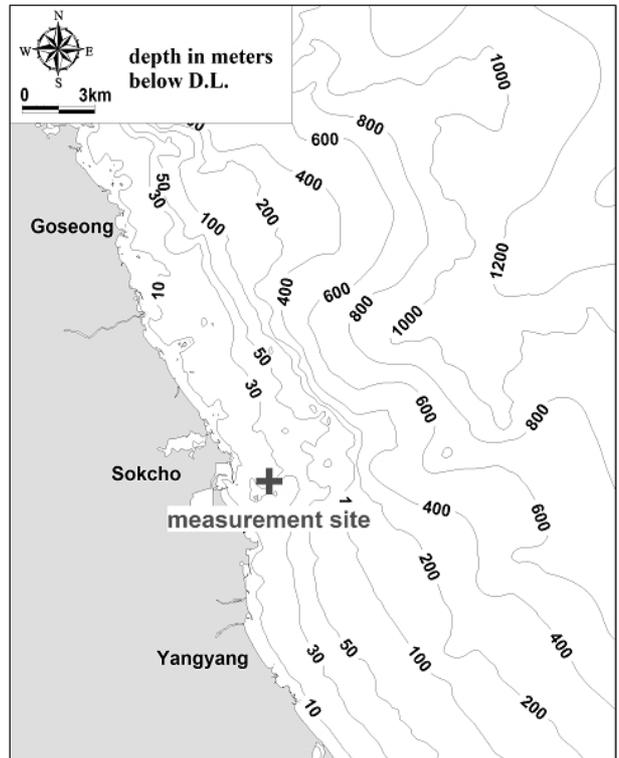


Fig. 3. Water Depth Contours

여기서 G_0 는 방향분산함수의 최대값이고, s 는 방향분산매개변수로서 다음과 같다.

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^2 s \left(\frac{\theta - \theta_p}{2} \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

$$s = \begin{cases} s_{\max} (f/f_p)^5, & f \leq f_p \\ s_{\max} (f/f_p)^{-2.5}, & f \geq f_p \end{cases} \quad (9)$$

Oh et al.(2010)은 너울성 고파를 파고 3m 이상, 주기 9초 이상의 파로 정의하였다. 본 연구에서 심해 너울성 고파의 제원으로 유의파고가 $H_s = 3.0, 5.0, 7.0m$ 의 3가지, 침두주기가 $T_p = 10, 15, 20$ 초로 3가지, 침두파향이 $\theta_p = N, NNE, NE, ENE, E$ 로 5가지, 침두신장인자가 $\gamma = 1.0, 3.3, 7.0$ 로 3가지로 총 135가지 경우에 대해 수치실험을 수행하였다. 대상해역의 수심은 국립해양조사원에서 발행하는 최신 수치지도를 이용하였다. 파랑변형 실험 격자망과 수심도를 각각 Figs. 2, 3에 도시하였다.

외해(Fig. 4의 B 지점)에서 유의파고가 $H_s = 3m$, 침두주기가 $T_p = 10$ 초, 침두파향이 $\theta_p = NE$, 침두신장인자가 $\gamma = 3.3$ 인 경우에 계산된 파랑 벡터도를 Fig. 4에 도시하였다. 해안선 가까이에서

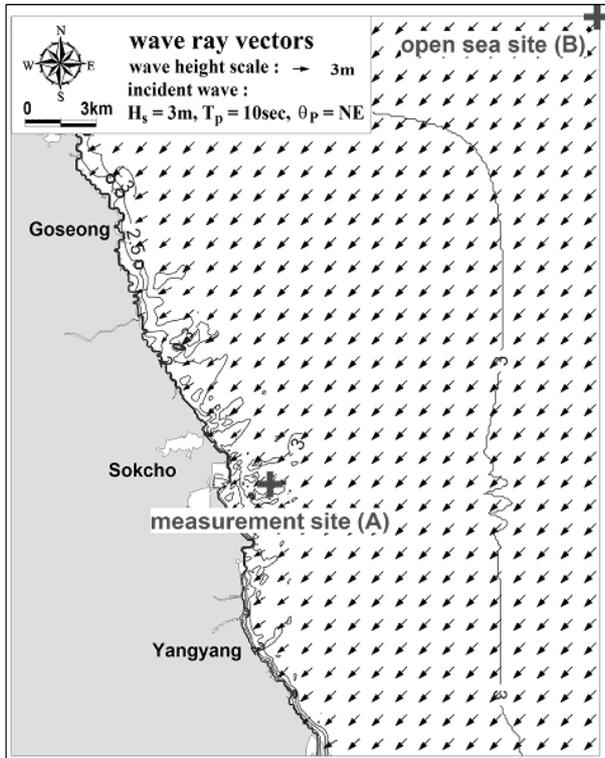


Fig. 4. Wave Ray Vectors (Open Sea Condition: $H_s = 3m, T_p = 10sec, \theta_p = NE, \gamma = 3.3$)

도 침두파향은 거의 변하지 않았다. 이는 동해안은 해안선이 NNW 방향에서 SSE 방향으로 거의 직선으로 이어져 있어서 등수심선의 직각 방향이 침두파향(즉, NE 방향)과 유사하여 파향의 변화가 거의 나타나지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 외해에서부터 해안선 방향으로 수심 30m 지점까지도 유의파고가 3m 였다가 관측지점 근처에서 천수 현상으로 증가하다가 해안선에 다가와서는 쇄파로 감소하였다.

2.2 관측지점과 외해지점간의 파랑제원 상관성 분석

파랑변형 실험을 통해 속초의 관측장비 설치지점(A)과 외해 지점(B)간의 파랑제원의 상관성 분석을 수행하였다. 즉, 임의의 파가 내습하는 것으로 가정하여 외해 경계조건을 설정하고, 관측지점까지 계산한 뒤 관측지점의 파랑 정보로부터 외해 파랑제원을 역으로 추정하였다. 설정지 사이의 값은 선형 내삽하여 추정하고, 설정 범위를 벗어나는 경우 선형 외삽하여 추정하였다.

Fig. 5에 $\gamma = 3.3$ 인 경우 A, B 지점 사이의 유의파고의 상관 관계를 도시하였다. 침두주기가 길수록 관측지점에서 천수의 영향으로 유의파고가 증가하는 경향이 있다. 수심 $h = 18m$ 의 관측지점에서 침두주기가 각각 $T_p = 10, 15, 20$ 초의 경우 천수계수는 $K_s = 0.92, 1.02, 1.13$ 이다. 또한 외해의 침두파향이 굴절이 작게 발생하는 방향일수록 유의파고가 더 증가하는 경향이 있다. 예를 들어, 침두파향이 $\theta_p = N$ 방향인 경우 굴절이 아주 크게 발생하기 때문에 관측지점에서의 유의파고는 그렇게 크지 않다. 반면 침두파향이 $\theta_p = NE$ 방향인 경우 굴절이 작게 발생하기 때문에 관측지점에서의 유의파고는 크다. 특이한 것은, 침두파향이 $\theta_p = NE$ 방향인 경우 $\theta_p = ENE$ 방향인 경우에 비하여 굴절이 더 크게 발생하는데도 관측지점에서의 유의파고는 더 크다는 것이다. Fig. 3을 보면 관측지점으로부터 NE 방향으로 수심 30m와 100m 사이의 곳곳에 수중 둔덕이 있다. 따라서, NE 방향의 파랑이 이 둔덕의 지나면서 굴절이 좌우로 복합적으로 발생하고 더 나아가 관측지점에서 파랑 에너지가 집중된 것으로 판단된다.

Fig. 6에 $\gamma = 3.3$ 인 경우 A, B 지점 사이의 침두파향의 상관 관계를 도시하였다. 관측지점에서 굴절의 영향으로 파향이 해안선에 직각인 방향(대략 ENE 방향)으로 집중되었다. 이러한 경향은 침두주기가 길수록 더 크게 나타났다. 이는 주기가 길수록 굴절의 영향을 더 크게 받기 때문이다. 또한, 침두신장인자가 클수록 굴절의 영향이 미세하게나마 더 크게 나타났다. 침두신장인자가 크면 침두주기 주위 성분의 에너지밀도가 증가하는 반면 침두주기를 기준으로 고저 주파수 성분이 모두 감소한다. 그런데, 고주파수 성분보다 저주파수 성분의 에너지밀도가 덜 감소하여 저주파수(즉, 장주기) 성분에 의한 굴절이 더 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 파고가 클수록 굴절의 영향이 아주 미세하게 더 크게 나타났다.

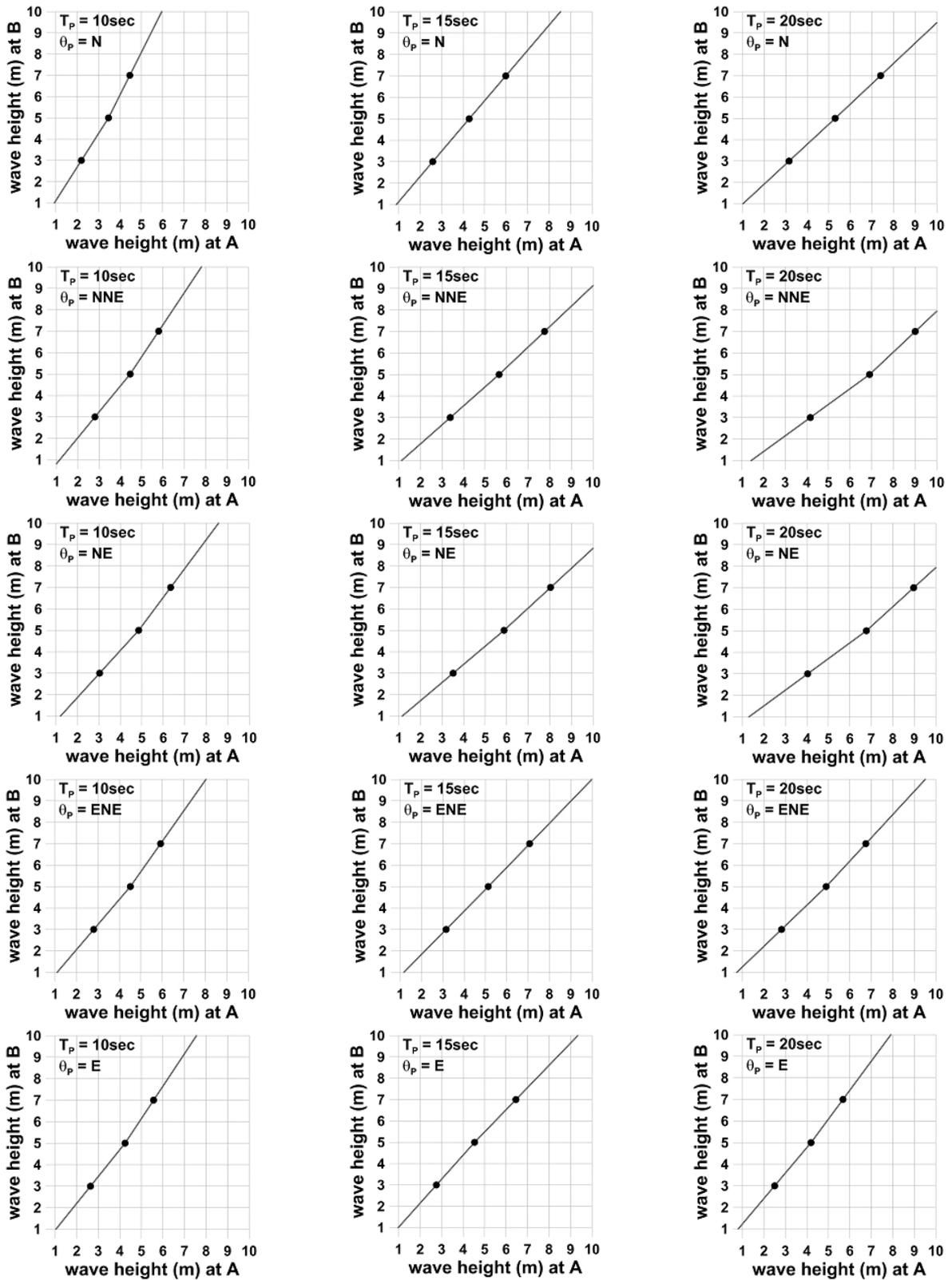


Fig. 5. Relation of Significant Wave Heights Between Point A and B ($\gamma=3.3$)

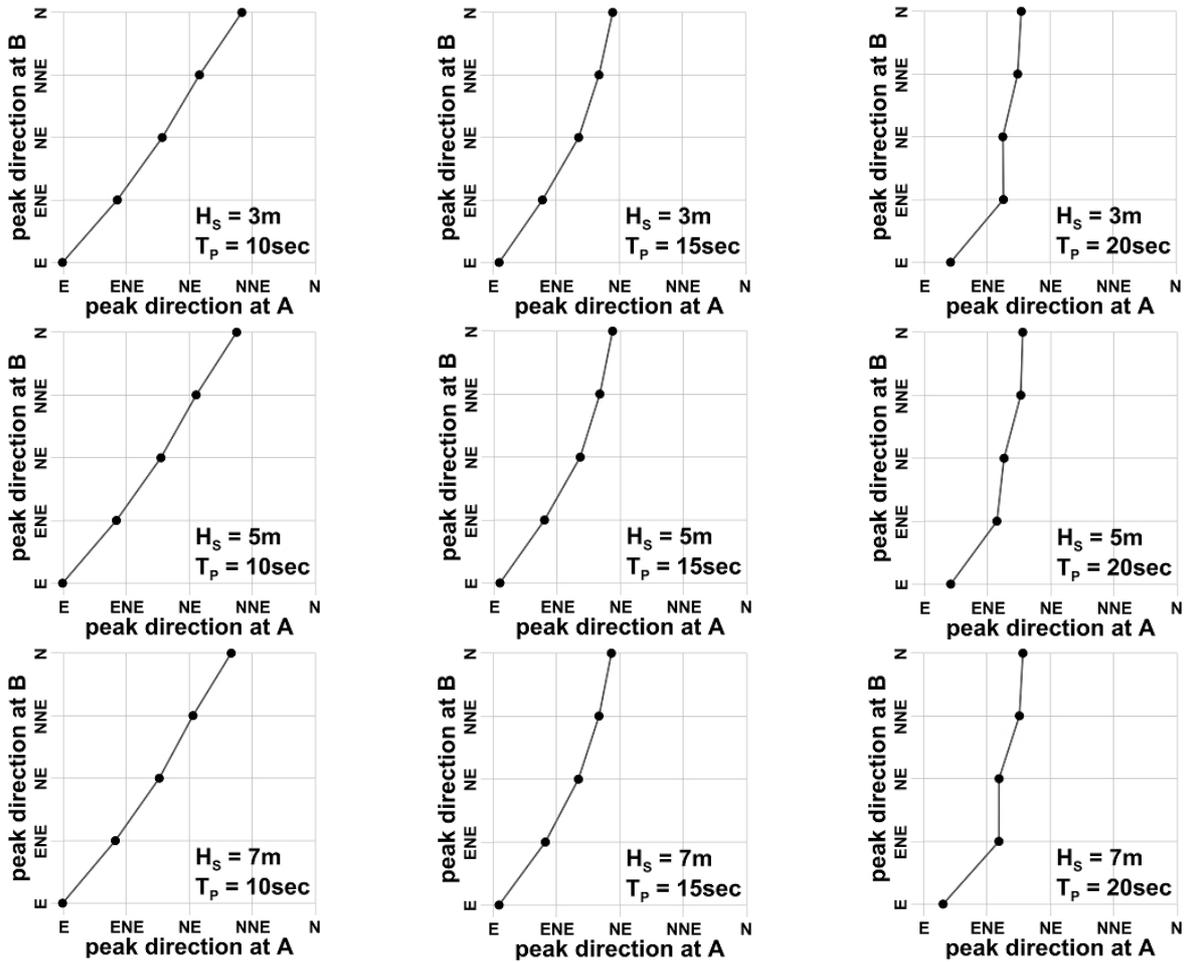


Fig. 6. Relation of Peak Directions Between Point A and B ($\gamma=3.3$)

2.3 외해 너울성 고파 추정

관측지점의 파랑 제한으로부터 외해 너울성 고파 발생 지점의 파랑제한을 추정하였다. 추정 시 침두주기는 관측지점과 외해 지점에서 동일하다. 본 연구에서 침두신장인자는 관측지점과 외해 지점에서 동일하다고 가정하였다. 외해 너울성 고파발생 지점의 파랑 제한을 구하는 과정은 다음과 같다.

- ① 관측지점의 수면변위 시계열이 주어지면 스펙트럼 분석을 통하여 유의파고, 침두파향, 침두주기를 구한다.
- ② 관측된 스펙트럼을 JONSWAP 스펙트럼으로 가정한다. 침두신장인자를 바꿔가면서 추정된 JONSWAP 스펙트럼밀도와 관측된 스펙트럼밀도의 오차의 제곱합이 최소가 될 때의 최적의 침두신장인자를 찾는다.
- ③ 관측지점의 유의파고를 외해지점의 유의파고로 가정하여 관측지점의 침두파향에 대응되는 외해지점의 침두파향을 회귀식을 이용하여 추정한다(예를 들어, $\gamma=3.3$ 인 경우 Fig. 6 이용).

- ④ 추정된 외해지점의 침두파향을 이용하여 관측지점의 유의파고에 대응되는 외해지점의 유의파고를 회귀식을 이용하여 추정한다(예를 들어, $\gamma=3.3$ 인 경우 Fig. 5 이용).
- ⑤ 추정된 외해지점의 유의파고를 이용하여 관측지점의 침두파향에 대응되는 외해지점의 침두파향을 회귀식을 이용하여 추정한다(예를 들어, $\gamma=3.3$ 인 경우 Fig. 6 이용).
- ⑥ 추정된 유의파고와 침두파향이 관측된 유의파고와 침두파향과의 오차가 10^{-10} 이하로 충분히 작으면 추정과정을 마친다. 오차가 작지 않으면 오차가 충분히 작을 때까지 ④, ⑤의 과정을 반복하여 수행한다.

이번에는 너울성 고파의 추정방법의 적정성을 검토하였다. 먼저 관측지점에서 임의로 파랑제한을 설정한 뒤 이를 근거로 외해 너울성 고파를 추정하였다. 그리고, 이 추정값을 경계조건으로 하여 SWAN을 사용하여 관측지점의 파랑제한을 계산하였다. 이 계산값과 설정값 사이의 상대오차를 비교하였다.

임의로 총 4가지 조건(즉, $H_s = 3.5\sim 5.5m$, $T_p = 10\sim 19초$, $\theta_p =$

Table 1. Target Values at Measurement Site and Estimated Values at Open Sites

Case	Measurement site (target)				Open site (estimated)			
	H_s (m)	T_p (s)	θ_p	γ	H_s (m)	T_p (s)	θ_p	γ
1	3.5	10.0	N30.0°E	2.0	4.30	10.0	N06.8°E	2.0
2	3.5	12.0	N70.0°E	3.3	3.56	12.0	N65.3°E	3.3
3	5.0	19.0	N60.0°E	5.0	3.93	19.0	N40.4°E	5.0
4	5.5	16.0	N50.0°E	3.3	5.31	16.0	N08.3°E	3.3

Table 2. Errors of Wave Data at Measurement Site

Case	Target			Result by SWAN			Percent error		
	H_s	θ_p	γ	H_s	θ_p	γ	H_s	θ_p	γ
1	3.5m	N30.0°E	2.0	3.34m	N30.8°E	1.64	-4.6	2.7	-18.0
2	3.5m	N70.0°E	3.3	3.51m	N70.1°E	2.99	0.3	0.1	-9.4
3	5.0m	N60.0°E	5.0	5.43m	N60.4°E	4.75	8.6	0.7	-5.0
4	5.5m	N50.0°E	3.3	5.58m	N50.8°E	3.30	1.5	1.6	0.0

N30°E~N70°E, $\gamma=2.0\sim5.0$ 으로 입의의 조합으로 구성됨)에 대하여 적정성 검토를 하였다. 관측지점에서 설정된 파랑 제한과 외해지점에서 추정된 파랑 제한을 Table 1에 나타내었다. 침두파향에 따라 굴절정도가 다르기 때문에 외해지점에서 추정된 유의파고가 관측지점에서 설정된 유의파고보다 더 크기도 하고(Case 1, 2), 더 작기도(Case 3, 4) 하였다. 모든 경우에 외해지점에서 추정된 침두파향이 관측지점에서 설정된 침두파향보다 더 북쪽으로 바뀌었다. 이는 대체로 북쪽에서 남쪽으로 향하던 파랑이 해안선 근처에서 굴절로 인하여 서쪽으로 꺾이기 때문이다.

외해지점에서 추정된 파랑 제한을 경계조건으로 하여 SWAN으로 계산된 값과 원래의 설정값을 Table 2에 비교하였다. 침두파향은 모든 실험안에 대해 3% 이하의 오차율을 보였으며, 유의파고는 9% 이하, γ 는 18% 이하의 오차율을 보였다. Case 1은 외해지점의 파향이 N에 가까워서 굴절이 크게 발생하면서 추정의 정확성에 한계가 커서 오차가 가장 크게 나온 것으로 판단된다. 모든 실험안에 대해 설정치와 계산치가 대체로 일치하였다.

관측위치에서 설정된 스펙트럼 밀도와 추정 후 계산된 스펙트럼 밀도를 Fig. 7에 비교하였다. 설정된 스펙트럼 밀도와 계산된 스펙트럼 밀도가 서로 유사하게 나타났으며, 본 연구의 위해 너울성 고파 추정방법에 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

3. 동해안 주요지역 너울성 고파 예측

본 절에서는 제2장에서 추정된 외해의 파랑정보로부터 동해안 주요지역의 너울성 고파를 예측하였다. 외해의 파랑정보로 유의파고, 침두주기, 침두파향을 사용한다. 주요지역의 파랑정보로 유의파

고, 침두주기, 침두파향, 도달시간(즉, 속초 동방등표에서 관측된 파랑이 동해안 주요지역에 도달하는 시간)이 있다. 동해안 주요지역으로 과거에 너울성 고파의 피해가 있었던 강릉, 동해, 영덕, 울산을 정하였다. 주요지역의 고파 예측지점으로 각 지역의 방파제로부터 외해 방향으로 동쪽 또는 북쪽으로 떨어진 수심 20m 지점을 선택하였다. 동해안의 해안선은 비교적 단순하다. 따라서, 외해에서 동해안 주요지역 20m 수심 지점으로 전파하는 파랑은 주로 천수, 굴절이 발생하지만 회절, 쇄파, 파랑간의 비선형 현상 등은 그리 크지 않을 것이다. 속초 동방등표에서 관측된 파랑이 실시간으로 20분 간격으로 전송된다. 만약 전송되는 파랑의 유의파고가 3m 이상이고, 침두주기가 9초 이상인 경우 너울성 고파로 인지하고, 관측과 동시에 동해안 주요지역에 너울성 고파가 도달할 것임으로 알려주어야 한다. 따라서, 관측 후 예측 하는 시간은 짧을수록 좋다. 본 연구에서 주요지역의 파랑을 예측하는 알고리즘으로 파랑의 천수, 굴절을 모의하는 파향선 추적법(Munk and Arthur, 1952; Wilson, 1966)을 사용하였다.

3.1 Munk와 Arthur(1952)의 파향선 추적법(침두파향, 도달시간 예측)

너울성 고파의 파향, 도달시간을 예측하기 위하여 Munk and Arthur (1952)의 파향선 추적법을 사용하였다. 파향선(s)과 파봉선(n)은 서로 직각으로 만나며, 파향선은 수심이 얇은 쪽으로 꺾이고 파봉선은 진행할수록 등수심선과 나란해지는 성질을 가지고 있다. Fig. 8(a)와 같이 dt 시간 동안 파향선의 s 방향으로의 이동거리 ds 와 x, y 축 방향의 거리 dx, dy 는 다음의 관계가 있음을 알 수 있다.

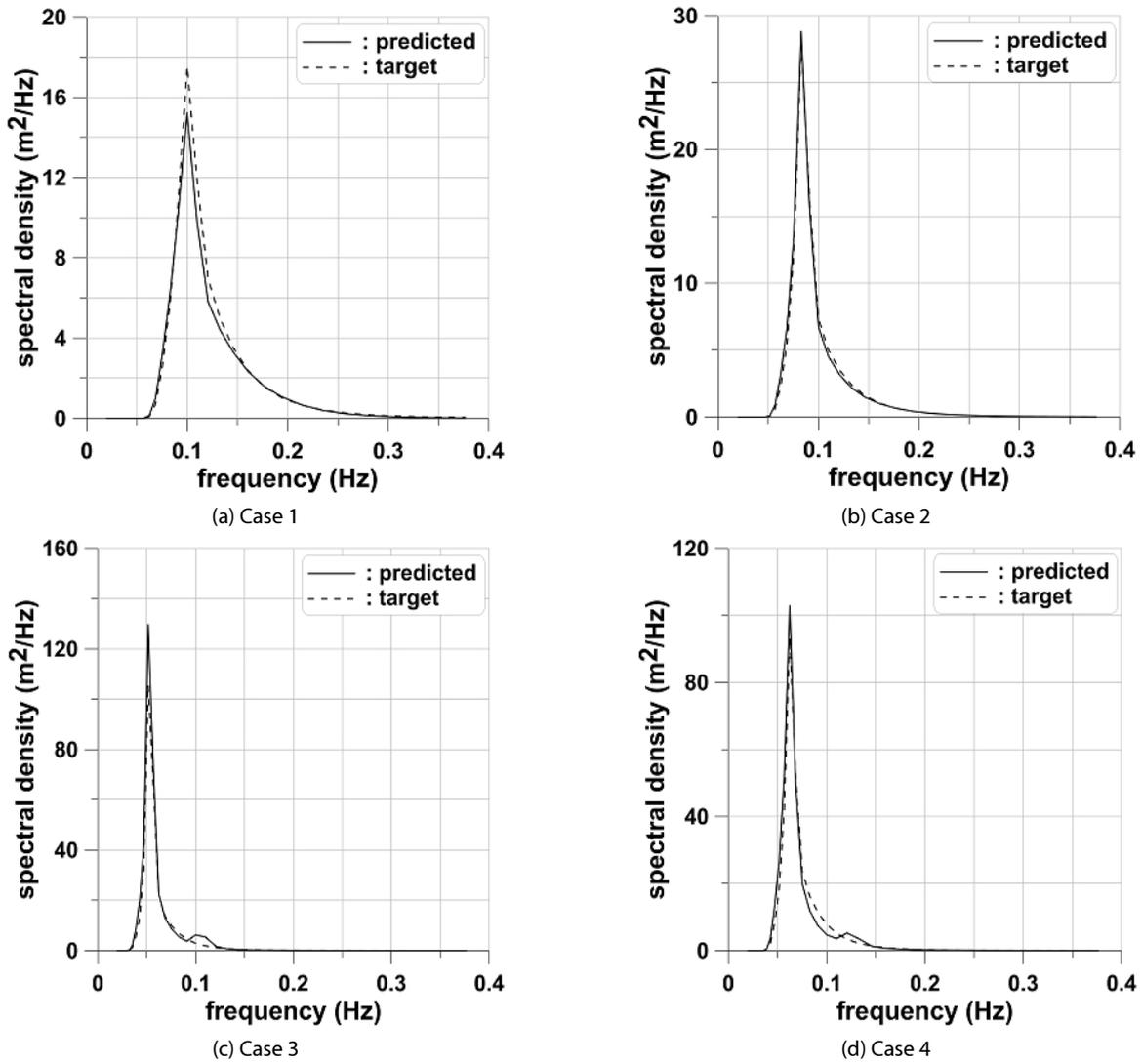


Fig. 7. Comparison of Predicted and Target Spectral Densities for Several Cases

$$\frac{ds}{dt} = C \quad (10)$$

$$\frac{dx}{dt} = C \cos \theta \quad (11)$$

$$\frac{dy}{dt} = C \sin \theta \quad (12)$$

여기서 C 는 위상속도이고, θ 는 파향선이 x 축과 이루는 각이다. Figs. 8(a) and (b)를 이용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$dx = ds \cos \theta = -dn \sin \theta \quad (13)$$

$$dy = ds \sin \theta = dn \cos \theta \quad (14)$$

$$d\theta \cong \tan \theta d\theta = -\frac{dC dt}{dn} \quad (15)$$

따라서, Eq. (15)으로부터 굴절각 θ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\partial C}{\partial n} = -\left(\frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial n} + \frac{\partial C}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial n} \right) = \sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \quad (16)$$

초기위치 (x_0, y_0) 에서의 수심 h_0 , 주기 T , 파향각 θ_0 가 주어지면, 분산관계식을 이용하여 파속 C_0 를 구할 수 있다. Eqs. (10), (11),

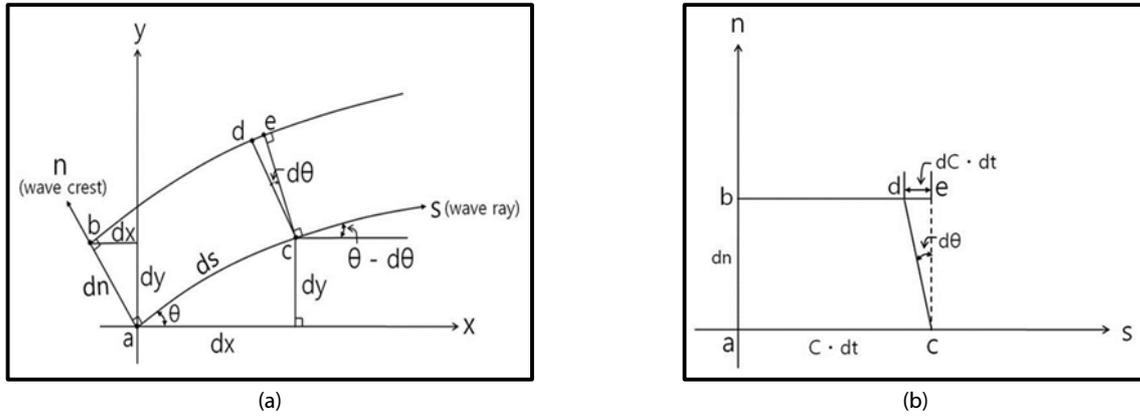


Fig. 8. Drawing for Wave Ray Approach. (a) Wave Ray and Crest, (b) Phase Speed in Wave Ray

(12), (16)을 이용하여 파향선의 다음 위치 (x_1, y_1) 와 파향각 θ_1 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_1 = x_0 + \Delta t \times C_0 \cos \theta_0 \quad (17)$$

$$y_1 = y_0 + \Delta t \times C_0 \sin \theta_0 \quad (18)$$

$$\theta_1 = \theta_0 + \Delta t \times \left[\sin \theta_0 \frac{\Delta C_0}{\Delta x} - \cos \theta_0 \frac{\Delta C_0}{\Delta y} \right] \quad (19)$$

격자간격은 $\Delta x = \Delta y = 100m$, 시간 간격은 $\Delta t = 5sec$ 로 하여 수행하였다. Eq. (19)에서 $\Delta C_0 / \Delta x$, $\Delta C_0 / \Delta y$ 를 중앙차분법으로 치분하였다. 새로운 지점을 초기위치로 하여 위의 방법을 반복적으로 사용하여 파향선의 위치를 계산한다.

파향선은 위상속도로 이동하지만 너울성 고파의 에너지는 균속도로 이동한다. 따라서, 너울성 고파의 도달시간(= 거리/균속도)을 다음 식으로 구하였다.

$$\text{도달시간} = \sum_j \left(\frac{ds}{C_g} \right)_j \quad (20)$$

3.2 Wilson(1966)의 파향선 추적법(유의파고 예측)

너울성 고파의 유의파고를 예측하기 위하여 Wilson (1966)의 파향선 추적법을 사용하였다. 천수와 굴절을 고려한 유의파고를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_s = H_{s0} K_s K_r \quad (21)$$

여기서, H_s 는 유의파고, $K_s (= \sqrt{C_{g0}/C_g})$ 는 천수계수, $K_r (= \sqrt{1/\beta})$ 은 굴절계수, $\beta (= b/b_0)$ 는 인접한 두 파향선 간 폭 b 의 비이다. 아래첨자 0은 삼해에서의 변수를 의미한다. β 는 다음의 미분방정식을 차분함으로써 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2\beta}{ds^2} + p \frac{d\beta}{ds} + q\beta = 0 \quad (22)$$

여기서,

$$p = -\frac{1}{C} \left(\frac{dC}{dx} \cos \theta + \frac{dC}{dy} \sin \theta \right) \quad (23)$$

$$q = \frac{1}{C} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \sin^2 \theta - 2 \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} \sin \theta \cos \theta + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \cos^2 \theta \right) \quad (24)$$

Eqs. (23) and (24)에서 dC/dx , dC/dy , d^2C/dx^2 , d^2C/dy^2 , $d^2C/dx dy$ 를 중앙차분법으로 치분하였다. Eq. (22)의 파향선의 이동거리 ds 가 공간적으로 서로 다르기 때문에 미분식 $\partial^2\beta/\partial s^2$ 와 $\partial\beta/\partial s$ 를 통상적으로 치분하는 방법을 쓸 수 없다. 따라서, β 를 2차의 라그랑주의 내삽 다항식(Lagrange interpolating polynomial)으로 표현한 뒤 다음과 같이 미분식을 차분하였다(Chapra and Canale, 2006).

$$\begin{aligned} \frac{\partial\beta}{\partial s} = & \frac{s_i - s_{i+1}}{(s_{i-1} - s_i)(s_{i-1} - s_{i+1})} \beta_{i-1} \quad (25) \\ & + \frac{2s_i - s_{i-1} - s_{i+1}}{(s_i - s_{i-1})(s_i - s_{i+1})} \beta_i + \frac{s_i - s_{i-1}}{(s_{i+1} - s_{i-1})(s_{i+1} - s_i)} \beta_{i+1} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 \beta}{\partial s^2} = \frac{2}{(s_{i-1} - s_i)(s_{i-1} - s_{i+1})} \beta_{i-1} + \frac{2}{(s_i - s_{i-1})(s_i - s_{i+1})} \beta_i + \frac{2}{(s_{i+1} - s_i)(s_{i+1} - s_{i-1})} \beta_{i+1} \quad (26)$$

여기서, 아래첨자 i, j 는 각각 해안선 방향과 해안선에 직각방향의 격자점이다. Eqs. (25) and (26)을 Eq. (22)에 대입한 뒤, $i+1$ 번째 (즉, 해안선 방향의) 미지수 β 를 찾는다.

3.3 동해안 너울성 고파 예측법 검증

관측지점에서 스펙트럼 정보가 입력된 후, 관측지점과 외해지점 간의 파랑의 상관관계를 이용하여 외해지점에서의 파랑정보를 추정하고, 마침내 동해안 주요지역의 너울성 고파를 예측하는데 PC에서 1분 이내로 걸렸다. 이는 파랑예측 면에서 충분히 짧다고 판단된다. 동해안 주요 지역 수심 20m 지점의 너울성 고파를 예측할 때 파향선 추적법을 사용하였다. 파향선 추적법은 파랑의 천수와

Table 3. Comparison of Swell-Like Significant Wave Data Against Target at Measurement Site for Several Cases

Case	Target		Result by wave ray approach	
	H_s (m)	θ_p	H_s (m)	θ_p
1	3.5	N30.0°E	3.11 (-11.1% error)	N34.9°E (-2.0% error)
2	3.5	N70.0°E	3.94 (12.6% error)	N73.0°E (-1.5% error)
3	5.0	N60.0°E	6.80 (36.0% error)	N64.6°E (-2.2% error)
4	5.5	N50.0°E	6.07 (10.4% error)	N48.7°E (0.6% error)

Table 4. Information of AWAC Measurement Site at Sokcho

Site	Location	Water depth
Sokcho	38°11'57.5"N 128°37'23.6"E	D.L.(-)18m

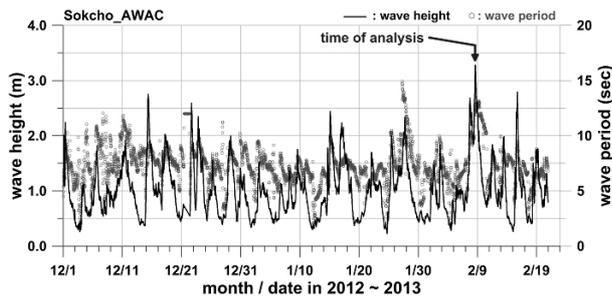


Fig. 9. Time Series of Significant Wave Height and Peak Period Measured with AWAC at Sokcho

굴절만을 고려하므로, 예측의 정확성을 확인할 필요가 있다. 따라서, 제2.3절에서 수행한 실험과 동일한 조건에 대해 관측위치의 파랑제원의 설정값과 파향선 추적법을 사용한 계산값을 비교하여 동해안 너울성 고파 예측 방법의 적정성을 검토하였다. 즉, 관측지점의 설정값으로부터 외해 파랑을 추정된 후 그 값을 파향선 추적법의 경계조건으로 설정하여 실험을 수행하였다. Table 3에 검증 결과를 제시하였다. 파향선 추적법은 파랑의 천수와 굴절만을 고려하였는 데도 유의파고는 36% 이하, 침두파향은 3% 이하의 오차로 나와서 예측이 대체로 정확하다고 판단된다. 참고로 제2.3절의 Table 2에서 SWAN을 사용한 경우 유의파고는 9% 이하, 침두파향은 3% 이하의 오차가 나왔다.

4. 너울성 고파 예측 알고리즘 적용

4.1 관측 자료 분석

국립해양조사원에서는 2012년 12월부터 속초 동방등표 인근에서 AWAC 관측장비를 활용하여 유의파고, 침두주기, 침두파향 뿐만 아니라 주파수 스펙트럼, 방향 스펙트럼 등 다양한 파랑 정보를 실시간 관측하고 있다. 속초 동방등표 위치 및 수심을 Table 4에 제시하였다. AWAC 관측장비 설치위치는 속초 동방등표에서 북동쪽으로 약 50m 이격된 지점이다.

동해안의 너울성 고파는 주로 동계에 발생하며, 2012년 12월

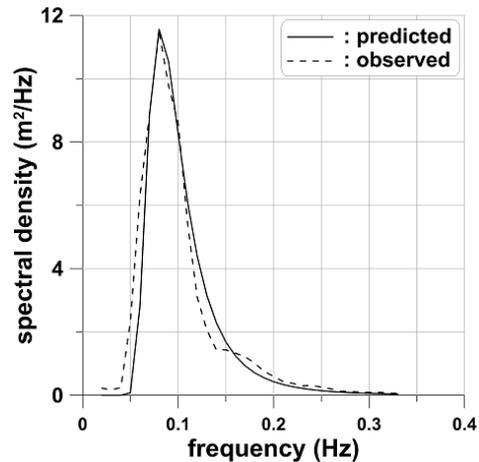


Fig. 10. Comparison of Predicted and Observed Spectral Densities at Measurement Site

Table 5. Swell-Like Significant Wave Data Observed at Measurement Site and Estimated Open Site

Site	H_s (m)	T_p (sec)	θ_p	γ
Measurement	3.24	12.33	N52.8°E	0.87
Open sea	3.14	12.33	N35.8°E	0.87

~ 2013년 2월의 관측자료를 분석하였다. 관측 기간 동안 유의파고는 대체로 2m 이내이고, 침두주기가 8초 내로 관측되었다. 속초 AWAC 관측장비의 2012년 12월 1일부터 2013년 2월 19일 사이 유의파고, 침두주기의 시계열을 Fig. 9에 도시하였다. 너울성 고파 예측 알고리즘의 적용은 관측기간 중 유의파고 3m, 침두주기 9초 이상의 너울성 고파 내습이 의심되는 2월 8일경으로 결정하였다. 최대 유의파고가 관측된 시점은 2월 8일 15:20경이었다.

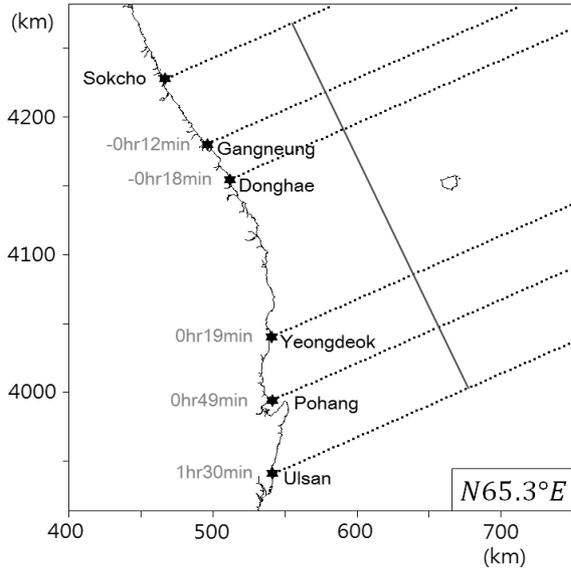


Fig. 11. Arrival Time of Swell-Like Waves from Sokcho to Several Points at East Sea (Case 2)

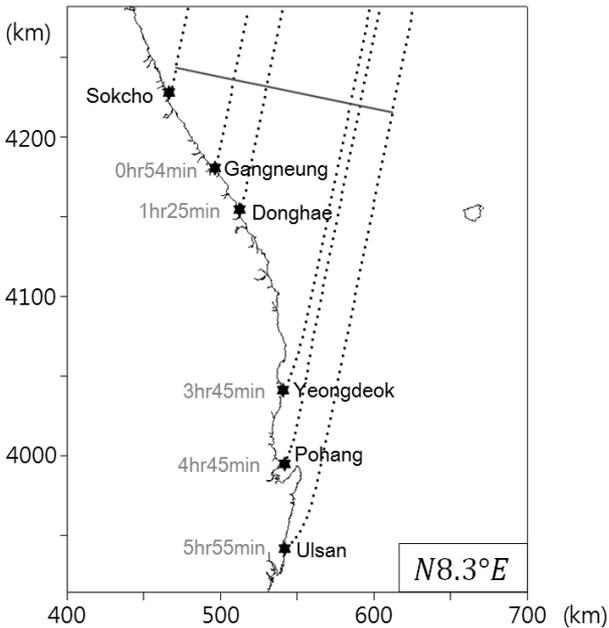


Fig. 12. Arrival Time of Swell-Like Waves from Sokcho to Several Points at East Sea (Case 4)

4.2 외해 너울성 고파 추정

속초 동방등표 인근의 AWAC 관측장비에서 2013년 2월 8일 15:20에 관측된 파랑 정보를 이용하여 외해 너울성 고파의 제원을 추정하였다. 관측위치의 유의파고는 3.24m, 침두주기는 12.33초이다. 파랑 스펙트럼을 JONSWAP으로 가정하고 관측 스펙트럼과의 오차의 제곱합이 최소가 되는 최소제곱법(method of least squares)을 사용하여 침두신장인자(γ)를 추정하였다. 추정 결과 $\gamma=0.87$ 이며, 외해 파랑 제원은 유의파고는 $H_s=3.14m$, 침두주기는 $T_p=12.33$ 초로 나왔다. 스펙트럼의 관측값과 추정값을 총 에너지 면에서 비교하기 위하여 다음 식으로 정의되는 상대오차 RE를 사용하였다.

$$RE = \frac{\int_f [S_p(f) - S_o(f)] df}{\int_f S_o(f) df} \times 100(\%) \quad (27)$$

위 식에서 아래 첨자 o 와 p 는 각각 관측값과 추정값을 의미한다. 그 결과 추정된 스펙트럼의 상대오차는 $RE=3.6\%$ 였다. 즉, 관측된 파랑의 스펙트럼을 JONSWAP으로 가정한 방법에 문제가 없는 것으로 판단된다. 관측위치의 파랑 스펙트럼 추정결과를 Fig. 10에 도시하였으며, 외해 파랑 추정 결과를 Table 5에 제시하였다.

4.3 동해안 너울성 고파 예측

동해안의 파랑 예측 지역은 과거 너울성 고파의 피해가 있었던 강릉, 동해, 영덕, 포항, 울산으로 정하였다. 파랑 예측 지점은 각 지역의 방파제 두부에서 외해 방향으로 수심 20m 지점으로 정하였다. 만약 파랑 예측 지점으로 해안선을 선택하면 해안선 가까운 곳에서 천수, 굴절, 회절, 쇄파 등이 발생하여 그 지역의 파랑 정보를 대표할 수 없는 문제점이 있다. 또한, 동해안의 해안선은 비교적 단조롭기 때문에 외해에서 동해안의 주요지역으로 전파하는 파랑은 주로 천수, 굴절의 과정이 발생하지만 회절, 쇄파, 파랑간의 비선형 현상 등은 그렇게 크지 않다.

제2장에서 분석한 가상의 4가지 파랑 제원 가운데 Case 2, 4에 대하여 파향선 추적법을 사용하여 파랑이 속초부터 동해안 각 지점까지 도달하는 시간을 파향선(점선), 파봉선(실선)과 함께 Figs. 11, 12에 도시하였다. 그림의 오른쪽 아래에 추정된 외해 파향을 도시하였다. 파향선은 해안선에 멀리 떨어진 곳에서는 거의 평행하다가 해안선 가까이에서 굴절되는 것을 볼 수 있다. Case 4(외해 파향각: $N8.3^\circ E$)와 같이 파랑이 거의 북쪽에서 전파하는 경우 속초에서 울산까지 도달하는데 오랜 시간(즉, 5시간 55분) 경과하였다. 반면 Case 2(외해 파향각: $N65.3^\circ E$)와 같이 파랑이 거의 동쪽에서 전파하는 경우 속초에서 울산까지 도달하는데 짧은 시간(즉, 1시간 30분) 경과하였다. 오히려 파랑이 강릉과 동해에

Table 6. Swell-Like Significant Wave Data Predicted at Several Points at East Sea (data at 15:20 8th Feb. 2013)

Case	(Longitude, Latitude)	h (m)	Arrival time	H_s (m)	θ_p	T_p (sec)
source point				3.14	N35.5°E	12.33
Sokcho	(128° 37' 22", 38° 11' 58")	18		2.77	N58.3°E	12.33
Gangneung	(128° 37' 22", 38° 11' 58")	20	0hr 37min	2.80	N41.3°E	12.33
Donghae	(129° 37' 22", 37° 32' 19")	20	0hr 58min	2.45	N38.1°E	12.33
Yeongdeok	(129° 27' 31", 36° 30' 41")	20	3hr 10min	2.80	N42.9°E	12.33
Pohang	(129° 27' 54", 36° 05' 45")	20	4hr 12min	2.63	N42.5°E	12.33
Ulsan	(129° 27' 42", 35° 37' 01")	20	5hr 28min	2.71	N59.8°E	12.33

Table 7. Comparison of Predicted Swell-Like Significant Wave Data Against Observed Values at Measurement Site (data at 15:20 8th Feb. 2013)

Observed value			Predicted value				
H_s (m)	θ_p	γ	SWAN			Wave ray approach	
			H_s (m)	θ_p	γ	H_s (m)	θ_p
3.24	N52.8°E	0.87	3.33 (2.8%)	51.7 (-2.0%)	0.98 (12.6%)	2.77 (-14.5%)	N58.3°E (-2.5%)

※ () : relative error compared to observed value

속초보다 먼저 도달하였다. 따라서, 파랑이 거의 북쪽에서 오는 경우 속초의 남쪽 주요지역에서 이에 대비하는 데 충분한 시간이 있는 반면, 파랑이 거의 동쪽에서 오는 경우 속초의 남쪽 주요지역에 이에 대비하는 데 시간이 충분하지 않다. 만약 울릉도에 파랑파고계가 있다면 속초 자료와 함께 동해안 전 해역의 파랑 정보를 알 수 있을 뿐만 아니라 동쪽에서 오는 파랑에 대비하는데 충분한 시간이 있을 것으로 판단된다.

Fig. 13에 제4.2절에서 분석한 실시간 파랑 자료(즉, 2013년 2월 8일 15:20에 관측된 파랑 자료)를 사용하여 이 파랑이 속초부터 동해안 각 지점까지 도달하는 시간을 파향선(점선), 파봉선(실선)과 함께 도시하였다. 외해 파향각이 N35.5°E로서 파향선이 해안선의 수직선과 거의 나란하게 전파하였다. 속초에서 울산까지 도달하는데 5시간 28분 경과하였다. 즉, 이 파랑에 대해 울산에서 너울성 고파를 예측하는 면에서 충분한 시간이 있다고 판단된다.

Table 6에 동해안 주요지역에서 예측된 너울성 고파의 도달시간, 유의파고, 침두파향을 나타내었다. 파랑이 북동(NE)쪽에서 전파하여 속초에서 울산까지 도달하는데 5시간 28분 경과하였고, 파랑이 강릉과 동해는 1시간 이내로 도달하였다.

Table 7에 관측지점에서 수치모형을 사용하여 너울성 고파를 예측한 결과를 관측값과 비교하였다. SWAN을 사용한 경우 유의파고는 +2.8%, 침두파향은 -2.0%, 침두신장인자는 12.6%의 오차가 나왔다. 파향선추적법을 사용한 경우 유의파고는 -14.5%, 침두파향은 -2.5%의 오차가 나왔다. 파향선 추적법은 파랑의 천수와 굴절만을 고려하여 유의파고의 오차는 SWAN에 비해서 더 크게

나왔다. 향후 SWAN을 사용하여 동해안 주요지역의 너울성 고파를 예측하는데 활용하면 특히 유의파고의 예측에 정확성이 향상되리라 판단된다.

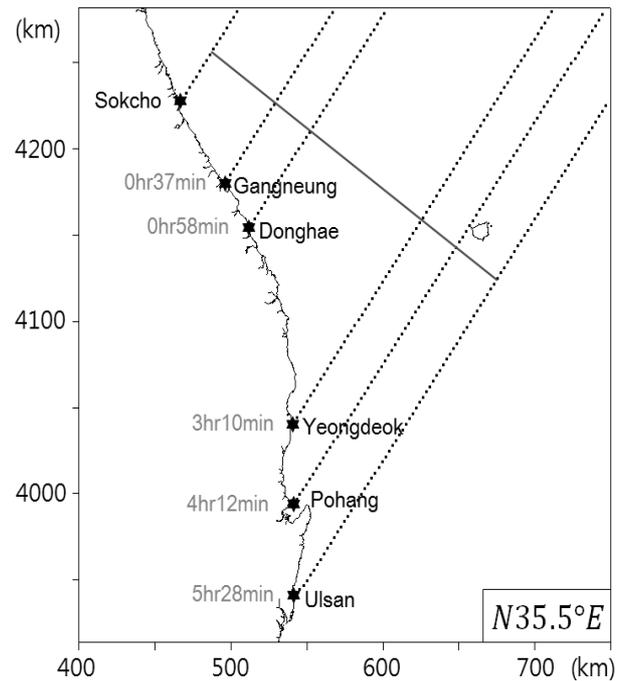


Fig. 13. Arrival Time of Swell-Like Waves from Sokcho to Several Points at East Sea (data at 15:20 8th Feb. 2013)

5. 결론

국립해양조사원에서는 2012년 말부터 속초 동방등표 인근에서 파랑과고계인 AWAC 관측장비를 활용하여 유의파고, 침두주기, 침두파향 뿐만 아니라 주파수 스펙트럼과 방향스펙트럼을 실시간으로 관측하고 있다. 본 연구에서 AWAC에서 관측되는 실시간 파랑 자료를 이용하여 동해안의 주요 지역에 너울성 고파를 예측하는 알고리즘을 개발하였다. 첫째, 속초 동방등표 근처 수심 18m 지점에 설치된 파랑과고계에서 관측된 유의파고가 3m 이상이고, 침두주기가 9초 이상이면 관측된 파랑 정보로부터 너울성 고파 발생지로 인식되는 외해의 파랑정보를 추정하였다. 파랑정보를 추정하기 위하여 유의파고, 침두주기, 침두방향, 침두신장인자의 다양한 조건에서 SWAN 파랑수치모형을 사용하여 관측지점과 외해지점 간의 상관관계를 찾았다. 둘째, 추정된 외해의 파랑정보로부터 동해안 주요지역의 너울성 고파를 예측하는 알고리즘을 개발하였다. 동해안의 주요지역으로 과거에 너울성 고파의 피해가 있었던 강릉, 동해, 영덕, 포항, 울산을 정하였다. 너울성 고파 예측지점으로 각 주요 지역의 방파제로부터 외해 방향으로 동쪽 또는 북쪽으로 떨어진 수심 20m 지점을 선택하였다. 주요지역의 파랑을 예측하는데 파랑의 천수, 굴절을 모의하는 파향선추적법을 사용하였다. 본 과업에서 너울성 고파 예측의 정확성을 검증하기 위하여 SWAN 모형과 파향선추적법을 사용하여 관측지점과 외해지점 사이에 유의파고, 침두파향, 침두신장인자의 상관성이 재현되는 지 확인하였다. 그 결과, 침두파향은 3% 이하의 오차로 잘 재현하였고, 유의파고는 SWAN과 파향선추적법에서 각각 9%와 36% 이하의 오차로 잘 재현하였다.

향후 너울성 고파 관측자료를 축적하여 본 연구결과를 보완하고 국립해양조사원의 실시간 관측 모니터링 등과 연계하면 본 연구가 우리나라 동해안의 너울성 고파의 예측 정확도를 향상하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 파향선추적법과 함께 SWAN을 사용하여 동해안 주요지역의 너울성 고파를 예측하는데 활용하면 특히 유의파고 예측이 개선될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2012년 국토해양부 예산의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Booij, N., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H. (1999). "A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation." *J. of Geophysical Research*, Vol. 103, No. C4, pp. 7649-7666.
- Chapra, S. C. and Canale, R. P. (2006). *Numerical methods for engineers*, McGraw-Hill, New York.
- Goda, Y., An, E. S. (1973). "On wave characteristics along the East Coast of Korea and some remarks on breakwater design." *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 21, No. 1, pp. 78-89 (in Korean).
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, E., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W. and Walden, H. (1973). "Measurement of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)." *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.*, Vol. 12, No. A8, pp. 1-95.
- Jeong, W. M. and Oh, S. H. (2009). "Abnormally high swells occurred on the East coast in recent several years." *2009 Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, pp. 2119-2122 (in Korean).
- Jeong, W. M., Oh, S. H. and Lee, D. Y. (2007). "Abnormally high waves on the east coast." *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 19, No. 4, pp. 295-302 (in Korean).
- Jeong, W. M., Oh, S. H., Ryu, K. H. and Kim, T. I. (2008). "Characteristics of abnormally high waves on the east coast, February 2008." *2008 Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, pp. 2480-2483 (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2012). *Construction of real time wave height and direction transfer and analysis system*, Report (in Korean).
- Mitsuyasu, H., Tasai, F., Mizuno, S., Ohkusu, M., Honda, T. and Rikiishi, K. (1975). "Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy." *J. of Physical Oceanography*, Vol. 5, No. 4, pp. 750-760.
- Munk, W. H. and Arthur, R. S. (1952). *Wave Intensity along a Refracted Ray*, National Bureau of Standards Circular 521, Washington D.C., pp. 95-108.
- Oh, S. H., Jeong, W. M., Lee, D. Y. and Kim, S. I. (2010). "Analysis of the reason for occurrence of large-height swell-like waves in the east coast of Korea." *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 22, No. 2, pp. 101-111 (in Korean).
- Wilson, W. S. (1966). *A method for calculating and plotting surface wave rays*, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Tech. Memo 17.