

WAM모형의 천해역 확장에 관한 연구 A Study on the Extension of WAM for Shallow Water

천제호* · 안경모** · 윤종태***
Jeho Chun*, Kyungmo Ahn** and Jong Tae Yoon***

요 지 : 심해역 파랑모형인 WAM에 쇄파와 삼파 상호작용을 추가하여 모형의 적용영역을 천해역으로 확장하였다. 확장된 모형의 검증을 위해 Chawla et al.(1998) 과 Beji and Battjes(1993)의 수리모형 실험에 본 모형을 적용하여 천해역에서의 파랑변형 및 비선형 3파 상호작용의 수치모의 기능을 확인하였고, 계산된 수치모의 결과들은 수리실험의 계측결과와 잘 일치하였다. 그리고 실제 해역에서의 적용성을 검토하기 위해 태풍 매미에 대한 파랑 모의에 적용하였고, 계산 결과를 거제, 부산, 울산에서의 관측치와 비교하였는데 만족스러운 일치를 보여주었다.

핵심용어 : WAM, 파랑모형, 천해역, 쇄파, 3파 상호 작용, 태풍 매미

Abstract : WAM(WAVE Model), deep water wave model has been extended to the region of shallow water, incorporating wave breaking, and triad wave interaction. To verify this model, two numerical simulations for hydraulic experiments of Chawla et al.(1998) and Beji and Battjes(1993) are performed. The computed results show good agreements with measured ones. To identify its applicability to real sea, it is applied to storm wave modelling for typhoon Maemi. Numerical results compared with measured ones at Geoje, Busan and Ulsan show reasonable wave height estimations.

Keywords : WAM, wave model, shallow water, wave breaking, triad wave interaction, typhoon Maemi

1. 서 론

1.1 연구배경

WAM(WAVE Model)은 Hasselman et al.(1988)에 의해 개발된 최초의 3세대 파랑모형으로서 지배방정식은 파랑작용보존식이다. 원천항(source term)을 통해 바람에너지의 입력, 백파 감쇠, 사파 상호작용(quadruplet wave interaction)을 모의하며 전파 식을 통해 파랑 스펙트럼의 전달, 굴절 및 흐름 효과를 고려할 수 있어 파랑 기상예보 및 후측 모형으로 전 세계에서 널리 사용되고 있다. 하지만 비록 수심 변화로 인한 굴절이 포함되어 있지만 근본적으로 심해역을 대상으로 한 전 지구적 모의를 목표로 개발된 모형이어서 천해역에는 적용이 제한되는 단

점이 있다. 이 때문에 천해에서의 파랑자료를 위해서는 WAM과 함께, 천해역 파랑모형인 SWAN(Simulating WAVes at Nearshore)이나 STWAVE 를 연계하여 천해역의 파랑을 계산해왔다.

SWAN은 대표적인 천해 풍파수치모형으로서 파랑의 생성 및 굴절뿐만 아니라, 쇄파에 의한 에너지 감쇠, 3파 상호작용(triad wave interaction) 등을 고려한다. 또한 격자 체계로 직각 격자계(rectangular grid system)뿐만 아니라, 곡선 격자계(curvilinear grid system)를 채용하고 있어 구면 좌표계(spherical coordinate system)의 적용도 가능하다.

그러나, 구면 좌표계의 경우, 같은 경도간격이라고 할 지라도 위도에 따라서 실제 거리가 달라진다. 이러한 것을 고려하기 위해서, WAM에서는 식 (1)과 같이 위도 방

*한동대학교 건설환경연구소 (Jeho Chun, Institute of Construction and Environmental Research, Handong Global University, Pohang, Kyeongbuk, 791-708, Korea, eulja01@hotmail.com)

**한동대학교 공간환경시스템공학부 (Kyungmo Ahn, School of Spatial Environment System Engineering, Handong Global University, Pohang, Kyeongbuk, 791-708, Korea, kmahn@handong.edu)

***경성대학교 토목공학과 (Corresponding author : Jong Tae Yoon, Department of Civil Engineering, Kyungsoo University, Busan 608-736, Korea, gtyun@ks.ac.kr)

항의 에너지 전달항 및 파랑 굴절항을 포함하고 있다. 하지만 SWAN에서는 이러한 고려가 없기 때문에 광역 파랑 모델링을 실시하는 데 한계가 있다. 그리고, 천해경계면에서 두 개의 상이한 모형을 결합해야 하는 불편함이 있기 때문에 하나의 풍파모형으로 심해로부터 천해까지 풍파를 모의할 수 있도록 하기 위해 본 연구가 수행되었다.

1.2 연구 방법 및 내용

본 연구에서는 심해 및 천해에 대해서 적용이 가능하도록 기존의 WAM을 천해역으로 확장하였다. 기존 WAM의 원천항(source term)에 수심 감소에 따른 쇄파와 삼파 상호작용을 추가하였다. 그리고 기존의 WAM에서는 연산의 효율을 위해 파랑 에너지 전달의 계산에서 실제 수심이 아니라 계급값으로 대표되는 근사된 수심을 이용하여 군속도를 계산한다. WAM의 이 기법은 영역이 크고, 수심효과가 크지 않은 지역에서는 효과적인 기법이 될 수 있지만, 수심의 영향이 중요한 천해역에서는 결과의 정확도를 크게 떨어뜨릴 수 있다. 이에 본 연구에서는 실제 수심을 이용하여 군속도를 계산할 수 있도록 WAM을 수정하였다.

천해로 확장된 수치모형을 Beji and Battjes (1993), Chawla et al. (1998) 등의 수리실험에 적용하여 파의 쇄파, 굴절, 삼파 상호작용 등을 중심으로 모형을 검증하였다. 그리고 현장에서의 적용성을 확인하기 위해 본 모형을 부산 인근 해상에 적용하여 태풍 매미에 의한 파랑을 수치모의 하였다.

2. 수치모형

2.1 지배방정식

WAM의 지배방정식은 파랑 에너지 스펙트럼의 전달 방정식(transport equation)으로 식 (1)과 같다(Monbaliu et al., 2000). 식 (1)의 수치적분에는 음해법의 일종인 분할단계법(fractional step method)과 수치분산의 제거를 위해 FCT(flux corrected transport) 기법이 사용되었다(천 등, 2006).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(c_\lambda F)}{\partial \lambda} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial(c_\phi \cos F)}{\partial \phi} + \sigma \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(c_\sigma \frac{F}{\sigma} \right) + \frac{\partial(c_\theta F)}{\partial \theta} = S \quad (1)$$

여기서,

$$c_\lambda = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{c_g \sin \theta}{R \cos \phi}, c_\phi = \frac{d\phi}{dt} = \frac{c_g \cos \phi}{R}$$

$$c_\theta = (kR)^{-1} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \phi} \Omega - \cos \theta \frac{\partial}{\partial \lambda} \Omega \right) + c_g \frac{\sin \theta \tan \phi}{R}$$

$$c_\sigma = \frac{\partial \Omega}{\partial t}$$

λ, ϕ : 경위도

σ : 상대 각주파수 ($=\sqrt{gk \tanh kh}$)

θ : 스펙트럼의 방향

R : 지구의 반경

Ω : 절대 각주파수, $\Omega = \sqrt{gk \tanh kh} + \vec{k} \cdot \vec{U}$

c_g : 군속도, $c_g = \partial \Omega / \partial k$

S : 원천함수, $S = S_{in} + S_{ds} + S_m + S_{bf} + S_{bf} + S_{bf}$

S_m : 바람에 의한 에너지 입력

S_{ds} : 백파에 의한 에너지 감쇠

S_m : 사파 비선형 상호작용

S_{bf} : 마찰에 의한 에너지 감쇠

S_{bf} : 삼파 비선형 상호작용

S_{bf} : 쇄파에 의한 파랑 에너지 감쇠

본 연구에서는 앞의 식 (1)의 원천 함수에 삼파 비선형 상호작용과 쇄파에 의한 에너지 감쇠식을 추가하여 WAM의 적용영역을 천해역으로 확장하였다.

2.2 천해 효과

2.2.1 삼파 상호작용

삼파 상호작용은 수심이 낮은 천해역에서 나타나는 파랑간 비선형 상호작용으로서 사파 상호작용과는 달리 저주파수영역에 있는 파랑 에너지를 고주파수영역으로 전달하는 역할을 한다. 일반적으로 심해에서 천해로 전달되는 파의 평균 주기는 점점 커지는데, 삼파 상호작용 때문에 천해역에서는 다시 주기가 짧아진다(Sorensen, 1993).

본 연구에서는 삼차 비선형 간섭 효과를 고려하기 위해서 Elderberky(1996)의 LTA(lumped triad approximation) 기법을 사용하였다. Elderberky(1996)의 식은 천해파랑 스펙트럼 모형인 SWAN에서 사용되고 있다. 삼차 비선형 간섭 효과에 대한 원천 함수식을 다음의 식 (2)에 나타내었다.

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = S_{nl3}^-(\sigma, \theta) + S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (2)$$

여기서, $S_{nl3}^+(\sigma, \theta) = \max \{0, \alpha_{EB} 2 \pi c_g J^2 |\sin(\beta)|$

$$(F^2(\sigma/2, \theta) - 2F(\sigma/2, \theta)F(\sigma, \theta))\}$$

$$S_{n13}^-(\sigma, \theta) = -2S_{n13}^+(2\sigma, \theta)$$

α_{EB} : 상수, $\alpha_{EB} = 1$ from Lavrenov(2004)

$$\beta: \text{biphase}, \beta = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{0.2}{Ur}\right)$$

$$Ur: \text{Ursell number}, Ur = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_s T^2}{d^2}$$

d : 수심

J : 상호간섭 계수(Madsen and Sorenson, 1993).

$$J = \frac{k_{\sigma/2}^2 (gd + 2c_{\sigma/2}^2)}{k_{\sigma} d \left(gd + \frac{2}{15} g d^3 k_{\sigma}^2 - \frac{2}{5} \sigma^2 d^2 \right)}$$

3차의 비선형 간섭효과의 발생조건은 Ursell number로 나타낼 수 있는데, 일반적으로 Ursell number 가 일 때 3차의 비선형 간섭효과가 발생한다.

2.2.2 쇄파에 의한 파랑 에너지 감쇠

본 연구에는 Battjes and Janssen (1978)의 식을 이용하여 쇄파에 의한 파랑 에너지 감쇠를 고려하였다. 쇄파에 의한 파랑 에너지 감쇠식은 다음의 식 (3)과 같다.

$$S_{br}(\sigma, \theta) = D_{tot} \frac{F(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{Bj} Q_b \left(\frac{\sigma_p}{2\pi} \right) H_m^2$$

$$E_{tot}: \text{파랑에너지의 합}, E_{tot} = \iint F(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

$$\sigma_p: \text{첨두주기,}$$

$$H_m: \text{최대파랑}, H_m = \frac{0.88}{k} \tanh\left(\frac{0.78}{0.88} kd\right)$$

$$\alpha_{Bj}: \text{Battjes and Janssen(1978) 상수}, \alpha_{Bj} = 1$$

$$Q_b: \text{쇄파랑}, \frac{1-Q_b}{\log Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2}$$

3. 천해역에서의 수치모형 검증

3.1 Chawla et al.(1998)의 수리모형 실험

3.1.1 수리모형 실험의 개요

Chawla et al.(1998)의 수리실험에서 사용된 수심도를 다음의 Fig. 1에 나타내었고 Fig. 1의 원형 천퇴에 대한 수식은 다음의 식 (4)와 같다.

$$h = \begin{cases} 9.13 - \sqrt{82.81 - (x-5)^2 - (y-8.98)^2} \\ 0.4 \end{cases} \quad (4)$$

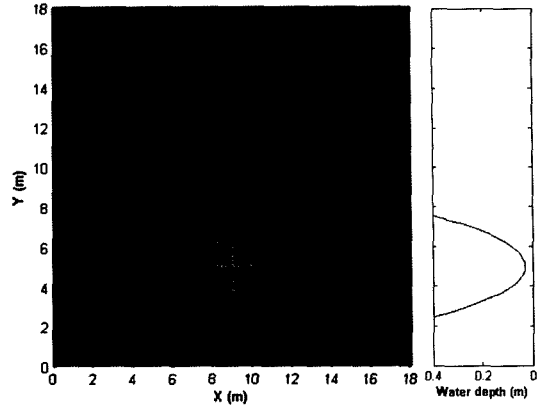


Fig. 1. Bathymetry for hydraulic experiment of Chawla et al.(1998).

$$(x-5)^2 + (y-8.98)^2 \leq 2.57^2 \quad (4)$$

otherwise

Chawla et al.(1998)의 수리실험에서 입사파랑 조건은 다방향불규칙파인데, 이때의 파랑 스펙트럼은 TMA 스펙트럼과 방향 분산함수(Wrapped normal direction spreading function)의 곱으로 정의된다. 이들에 대한 식을 다음의 식 (5), (6)에 나타내었다.

TMA spectrum:

$$S(f, h) = \Phi_p(f) \Phi_{pm}(f) \Phi_J(f) \Phi_{TMA}(f, h) \quad (5)$$

여기서,

$$\Phi_p(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5}, \Phi_{pm} = \exp[-1.25(f/f_p)^4]$$

$$\Phi_J = \exp[\log(\gamma) \exp(-(f-f_p)^2 / (2\sigma^2 f_p^2))]$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f < f_p \\ 0.09 & \text{else} \end{cases}$$

$$\Phi_{TMA}(f, h) = \begin{cases} 0.5w_h^2 & w_h \leq 1 \\ 1 & w_g \geq 2, w_h = 2\pi f \left(\frac{h}{g}\right)^{1/2} \\ 1 - 0.5(2 - w_h) & \text{else} \end{cases}$$

Wrapped normal directional spreading function:

$$D(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^J \left[\exp\left(-\frac{(j\sigma_m)^2}{2}\right) \cos j(\theta - \theta_m) \right] \quad (6)$$

수리실험에서는 4개의 입사파랑 조건이 고려되어졌는데, 이들 파랑 조건의 유의파고, 첨두주기, 방향분산각 등을 다음의 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Parameters for offshore wave conditions.

Cases	Hs (cm)	Tp (s)	σ_m (deg)
Test 3	1.39	0.73	5
Test 4	1.56	0.73	20
Test 5	2.33	0.71	5
Test 6	2.49	0.71	20

3.1.2 수치모의 실험

천해역으로 확장된 WAM모형을 Chawla et al.(1998)의 수리모형 실험에 적용하여 검증하였다. Chawla et al.(1998)의 수리모형 실험은 원형 천퇴에 의한 회굴절뿐만 아니라, 천퇴의 상단부에서는 쇄파작용도 발생하여 본 수치모형의 천해효과 검증에 적절한 경우이다.

본 모형이 지배방정식으로 사용하는 에너지 전달방정식은 근본적으로 회절현상을 제대로 재현하지 못한다. 이에 본 연구에서는 Chawla et al.(1998)의 수리모형 실험 중 회절효과가 가장 약한 Test 4에 대해서 수치모의 실험

을 실시하였다. Chen et al.(2005)도 SWAN을 본 수리모형 실험에 적용하였으나, 계산 결과가 좋지 않아 Test4에 대한 수치모의 실험 결과만을 제시하였다. 계산 격자간격으로 0.5 m를 사용하였고 식 (3)의 σ 는 Chen et al.(2005)의 것과 같은 1을 사용하였다. 수치모의 실험 결과 얻은 파랑 분포도를 수리실험 결과 및 Chen et al.(2005)의 계산 결과와 함께 다음의 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타나 있는 파고 파랑 분포도는 입사파고에 대한 각 지점의 파고비를 나타낸 것으로 각 단면의 위치는 Fig. 1에 표시되어져 있다.

Fig. 2를 보면 본 모형의 계산 결과는 수리실험 결과와 전체적으로 양호한 일치치를 보여주고 있다. 원형천퇴 후반부(단면 D-D)의 중앙에서 파고가 약간 과대 계산된 부분이 나타나긴 하지만, 굴절로 인한 천퇴 전반부에서의 에너지 집중과 후반부에서의 에너지 분산이 적절히 모의된 것으로 판단된다.

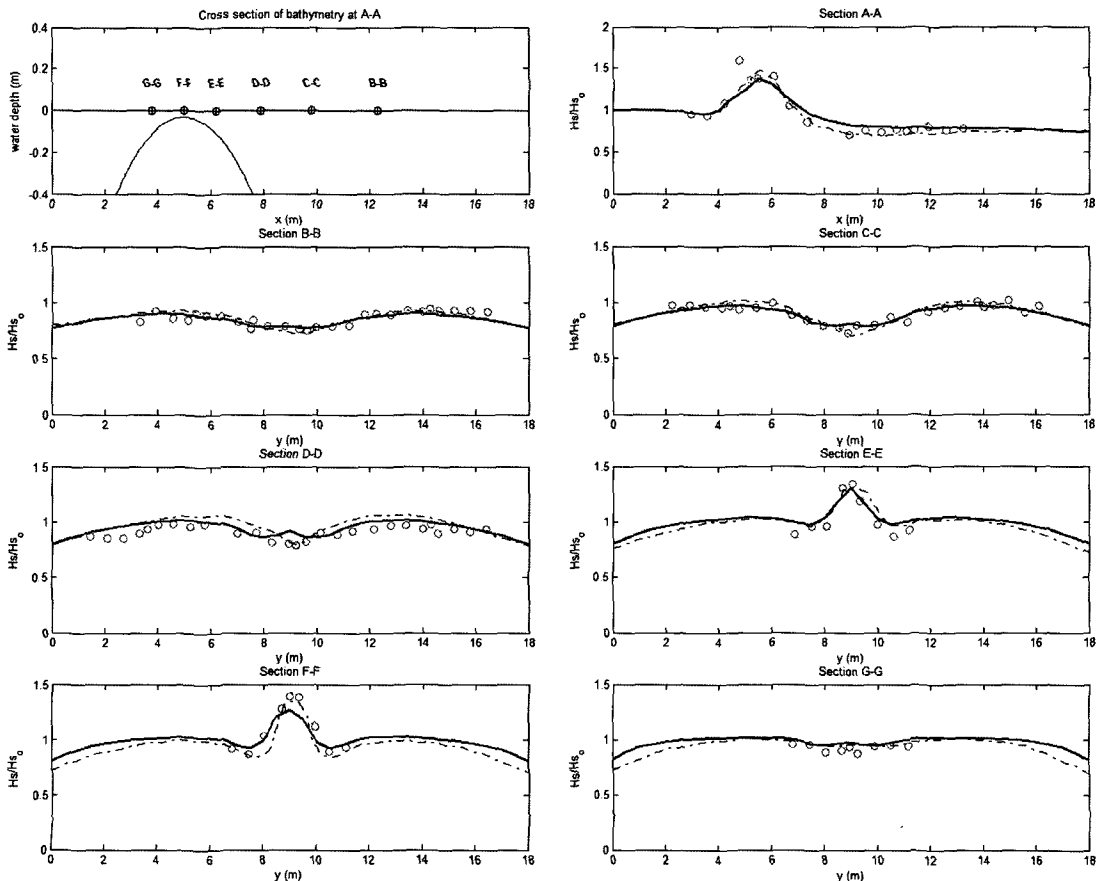


Fig. 2. Comparison of measured wave heights and computed wave heights, measured wave heights(green circle), computed wave heights of present study (blue solid line), computed wave heights of Chen et al.(black dotted line).

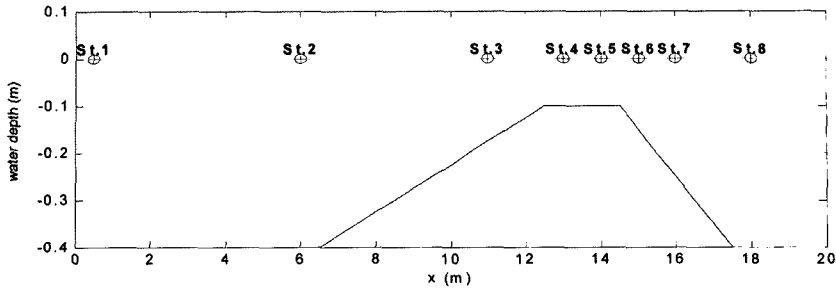


Fig. 3. Bathymetry for experiment of Beji and Battjes(1993).

Chen et al. (2005)은 급격한 지형변화를 보다 정확히 반영하기 위해 가변 격자 간격을 도입하였는데, 평지 및 원형 천퇴 중심부에서의 격자 간격은 각각 0.75 m, 0.23 m를 사용하였다. Chen et al.(2005)에 의하면 가변 격자 간격을 사용한 결과, 파랑 계산결과의 정확도가 크게 향상되었다. 본 연구의 계산 결과가 단면 F-F에서는 Chen et al.(2005)의 계산 결과보다 약간 낮은 값을 보여주지만, 단면 E-E와 단면 D-D에서의 결과를 보면 본 모형의 계산결과가 실험치와 더 나은 일치를 보여주고 있다.

3.2 Beji and Battjes (1993)의 수리모형 실험

Beji and Battjes (1993)의 실험수조를 다음의 Fig. 3에 나타내었다.

본 수리실험에서는 잠제(submerged breakwater)를 중심으로 삼파 상호작용이 발생하는데, Beji and Battjes (1993)는 Boussinesq 파랑 모델을 이용하여 저주파수의 파랑에너지가 고주파수 영역으로 전달되는 것을 보였다.

본 연구에서는 Beji and Battjes (1993)의 수리 실험에 본 연구의 파랑모형을 적용하여, 3파 상호작용을 검증하였다. 입사 파랑조건으로 JONSWAP 파랑 스펙트럼을 사용하였고 유의파고 및 침투 주파수는 각각 0.02 m, 0.5 hz를 사용하였다.

수치모의 실험 결과 얻은 파랑 스펙트럼을 수리 실험 결과 얻은 파랑 스펙트럼 및 SWAN 모형의 연산 결과 얻은 파랑 스펙트럼 등과 함께 다음의 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 나타나 있는 파랑 스펙트럼의 추출 위치는 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 4에서 보면, 본 연구의 수치모형 및 SWAN의 파랑 계산 결과와 수리모형실험 결과가 잘 일치하고 있어 LTA기법이 삼파 상호작용을 잘 재현함을 알 수 있다.

Fig. 4에서 St. 2의 수치 계산 결과가 실험치에 비해 다소 과소 산정되는 경향이 있다. 하지만, St. 1 과 St. 2

에서의 수심이 서로 일정하고, 본 연구의 파랑 계산 결과에서 St. 2에서의 파랑 계산결과는 St. 1에서의 파랑 계산결과와 유사하다. 이러한 점들에 의해, 본 연구의 계산 결과에 오차가 있는 것이 아니라, St. 2의 수리실험 결과에 잠제에 의한 반사파 성분이 포함되어져 나타나는 것으로 보여 진다.

파랑이 잠제의 천단부에 도달한 St. 4와 St. 5의 그림을 보면, 수치 및 수리 모형실험 결과 얻은 파랑 스펙트럼에서 삼파 상호작용으로 인해 0.5 Hz 영역의 파랑에너지는 줄어드는 반면에 1 Hz 영역의 파랑에너지는 증가하는 것을 볼 수 있다.

이 그림들에서는 본 연구 수치모형의 계산 결과와 SWAN의 파랑 계산결과에서 차이가 나는 것을 볼 수 있다. St. 4에서는 본 연구 수치모형의 파랑 계산결과가 0.5 Hz 영역에서 관측결과보다 과소평가하고 있지만, SWAN의 파랑 계산 결과는 관측결과와 잘 일치하고 있다. 반면에, St. 5에서는 수치모형 계산결과가 관측결과에 비해서 과대평가 되고 있지만, 본 연구의 수치모형의 계산결과가 SWAN의 계산 결과에 비해서 파랑 관측 결과에 더 가까운 것을 볼 수 있다. 그리고, 본 연구의 수치모형 계산 결과가 0.8 Hz에서 파랑에너지가 과대평가되어지는 것을 볼 수 있다.

이러한 계산 결과상의 차이는 본 연구의 수치모형 및 SWAN의 수치기법의 차이와 파랑정보 정의에 대한 차이에서 기인하는 것으로 판단되어진다.

St. 4는 잠제 천단부에 위치해 있을 뿐만 아니라, 수심이 급하게 변화하는 지점에 있어 삼파 상호작용과 파랑 에너지플럭스의 구배가 함께 나타난다. 이 때, SWAN의 파랑 기법에서는 이들을 동시에 고려하도록 되어져 있어, 삼파 상호작용이 파랑에너지플럭스의 구배와 평형을 이루면서 계산이 진행된다. 하지만, 본 연구의 수치기법에서는 분할단계기법(fractional step method)으로 인해서 파랑에

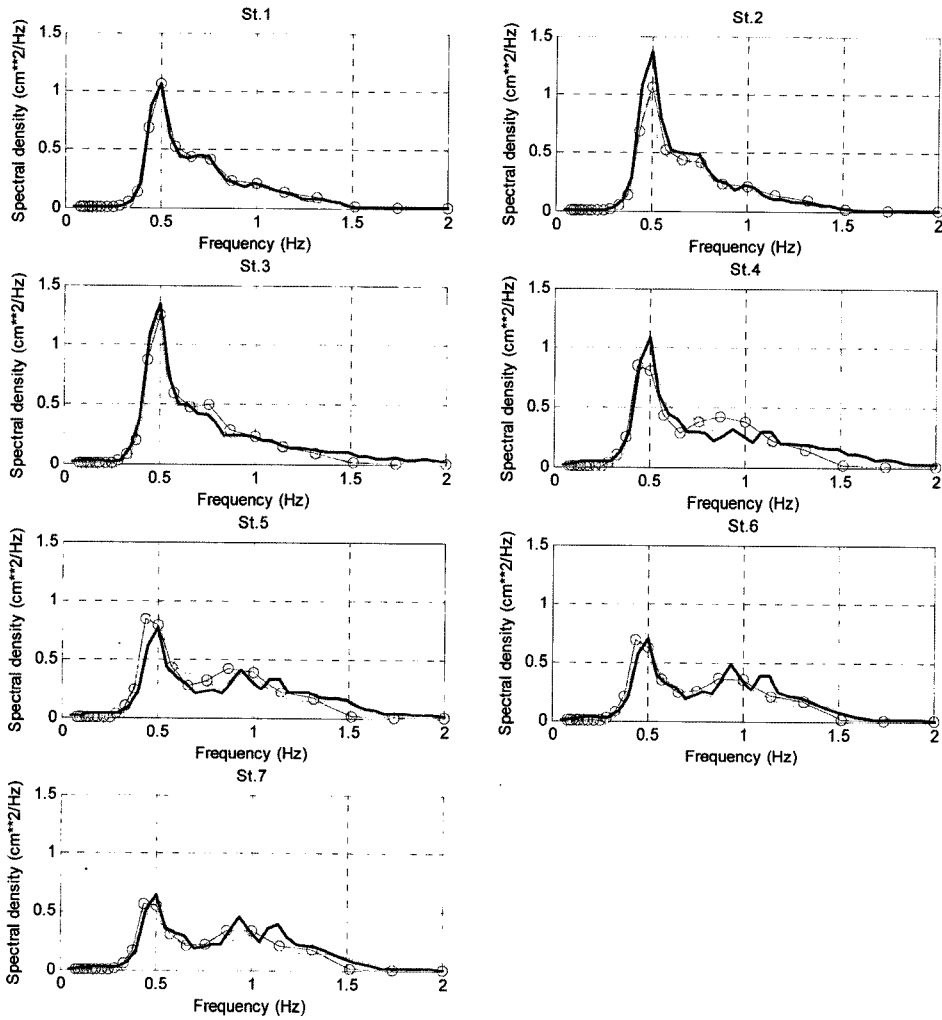


Fig. 4. Comparison between computed wave spectrums and measured wave spectrum, measured wave spectrum(red solid line), wave spectrum of present study (blue solid line with circle), wave spectrum of SWAN (green line with cross).

너지플릭스의 구배와 삼파상호작용은 별개로 계산되어진다. 그 결과, St. 4에서는 천수효과로 인해 파랑에너지가 커진 상태에서 삼파 상호작용이 활발하게 이뤄져 0.5 Hz에서는 본 연구의 계산결과가 과소평가하는 것으로 판단되어진다.

LTA기법에서는 3파 상호작용이 평균주기의 2.5배에 대해서까지 일어나도록 정의되어져 있다. 그런데, SWAN과 WAM에서는 평균주기를 각각 $\int S(f, \theta) df d\theta / \int S(f, \theta)$ 와 $\int f^{-1} S(f, \theta) df d\theta / \int S(f, \theta) df d\theta$ 로 정의되어져 이로 인해 평균 주기에서 미세한 차이가 벌어져 삼파 상호작용이 일어나는 파랑 스펙트럼의 범위가 달라진다. 그 결과, SWAN의 파랑 계산 결과에서는 1.5Hz 이상의 주파수 영역에서도

파랑 에너지가 발달되는 것을 볼 수 있다. 하지만, 본 연구의 수치모델에서는 그러지 못해서 St. 5에서 0.8 Hz의 파랑에너지가 약간 과대평가되어지고 있다.

잠재의 후면에 있는 St. 6과 St. 7에서는 본 연구 수치모델의 계산결과와 SWAN의 계산결과가 대체로 잘 일치하고 있다. 그리고, 이들 지점에서의 파랑 스펙트럼은 St. 4와 St. 5의 파랑 스펙트럼 모양을 유지하고 있으나, 전반적으로 파랑 에너지의 크기가 작아지는 것을 볼 수 있다. St. 6과 St. 7은 잠재 후면에 위치한 지역으로 수심이 커져 파고 깊어진다. 그리고, LTA 기법은 Ursell 수에 의해 의존되는데, 파고깊이 줄어들어 Ursell 수가 작아져 3파 상호작용은 일어나지 않는다. 그 결과, St. 4 및 St. 5에

서의 3차 상호작용으로 인해 형성된 파랑 스펙트럼의 모양을 그대로 유지하며, 전체적으로 파랑 에너지는 줄어드는 것으로 보여진다.

에너지의 전달이 일어나는 주파수대의 위치 및 에너지의 전달량 등을 실측치와 비교해 볼 때 삼파 상호작용이 식의 한계 내에서 적절히 모의된 것으로 판단된다.

4. 태풍파랑 모의

4.1 수치모의 실험 개요

천해역으로 확장된 WAM을 태풍 매미에 의한 태풍파랑 모의에 적용하여 실제 현장을 대상으로 본 연구의 수치모델을 검증하였다. 본 연구에서는 부산인근 해역에 대해서 태풍파랑을 수치모의하였는데, 본 지역은 지형적으로 천해 지형변화가 현저하며 2003년 태풍 매미가 큰 세력으로 고파랑을 발생시킨 바 있다. 수치모의 대상영역의 위치 및 크기를 수치모의 실험의 검증에 사용할 파고계 위치와 함께 다음의 Fig. 5에 나타내었다.

4.2 수치모의 계산 조건

수치모의 실험의 계산 영역은 거제도 일부 해역에서부터 울산인근 해역까지 약 92 km×75 km 이고 효과적인 수치모의를 위해 계산 격자로 30초를 사용하였다. 시간 격

자 간격으로는 120 s 를 사용하였으며, 이에 대한 CFL 수를 다음의 식 (7) 에 나타내었다.

$$\left| c_{\theta} \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right| \approx 5.9, \left| c_{\lambda} \frac{\partial \alpha}{\partial \lambda} \right| \approx 3.0, \left| c_{\phi} \frac{\partial \alpha}{\partial \phi} \right| \approx 3.7 \quad (7)$$

- 여기서, c_{λ} : 경도 방향의 군속도
- c_{ϕ} : 위도 방향의 군속도
- c_{θ} : 파향 방향의 군속도
- α : 시간 격자 간격
- $\delta\theta$: 파랑 스펙트럼의 방향 격자 간격
- $\delta\lambda$: 경도 격자 간격
- $\delta\phi$: 위도 격자 간격

태풍은 대체로 적도 인근의 저위도 지방에서 발생하여 한반도로 접근하는데, 태풍이 한반도에 상륙할 때에는 저위도 지방에서 태풍에 의해 생성된 고파랑도 함께 도달한다. 따라서, 앞의 Fig. 5의 계산 영역에 대해서 태풍파랑을 수치모의하기 위해서는 심해에서 태풍에 의해 생성된 파랑 정보를 함께 입력할 필요가 있다. 본 연구에서는 천 등(2006)의 파랑 계산 결과에서 얻은 파랑 정보를 경계 조건으로 사용하였다. 수치모의에 사용된 수심도를 다음의 Fig. 6에 나타내었다.

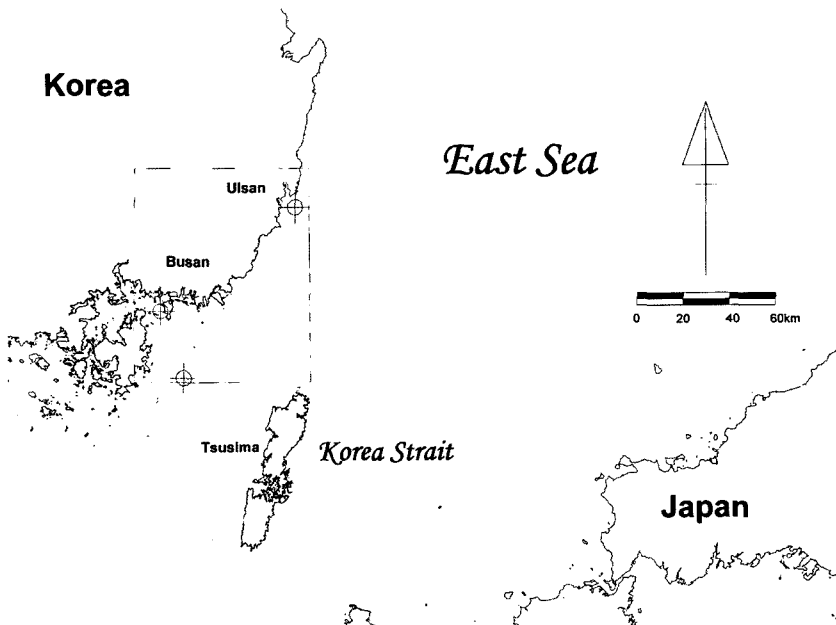


Fig. 5. Map of computational domain.

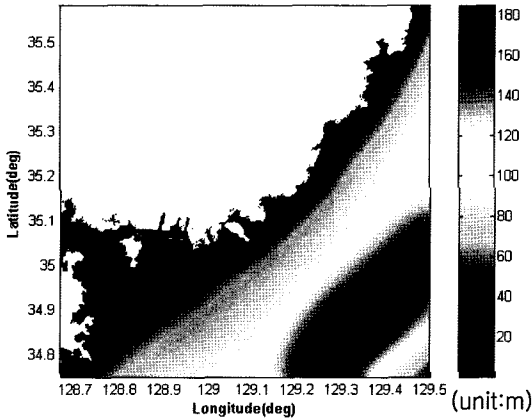


Fig. 6. Bathymetry for fine-grid wave model of typhoon Maemi.

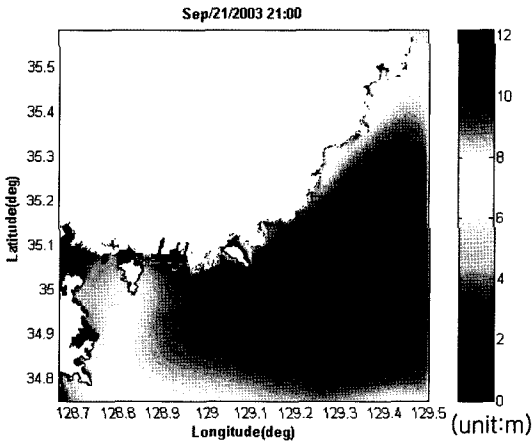


Fig. 7. Distribution of significant wave height.

4.3 수치모의 실험 결과

2003년 9월 11일 3시부터 66시간에 대해서 수치모의 실험을 실시하였다. 태풍이 부산 인근 해역에 상륙했을 당시에 대한 유의파고 분포도를 다음의 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보면, 부산항 전면 해상에서 약 8 m 이상의 매우 높은 파고가 생성되어 있음을 볼 수 있다.

모의된 파랑 스펙트럼으로부터 유의파고를 추출하여 Fig. 5의 3개 지점인 거제도 전면 해상, 부산 신항 그리고 울산에서의 파고 관측치와 비교하여 다음의 Fig. 8 ~ Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 8은 거제도 전면해상에서의 파랑관측 결과와 본 연구의 수치 계산 결과를 함께 비교한 것이다. 결과를 보면 본 모형의 연산결과가 전반적으로 약 1 m 이상 과대산정하고 있다. 당시의 관측자료를 보면 거제도에서 관측된 유의파고의 최대값은 7 m 이지만 최대파의 최대값은 16.9 m

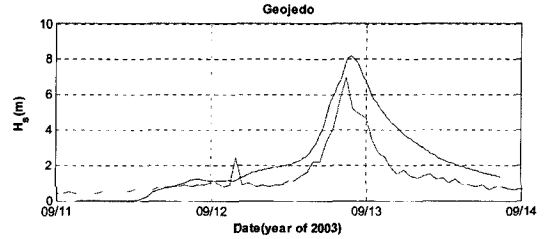


Fig. 8. Comparison of measured wave heights and computed wave heights, present study(blue solid line), measured wave heights(red solid line).

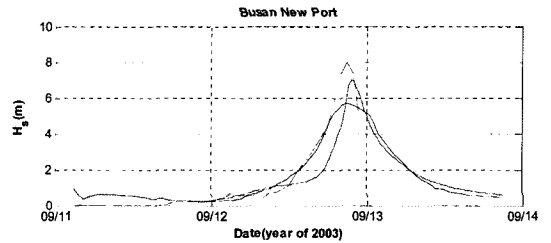


Fig. 9. Comparison between measured wave heights and computed results, present (blue solid line), measured wave heights(red solid line), Choi et al.(2004b)'s result(black solid line).

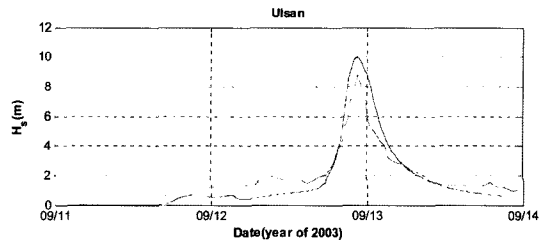


Fig. 10. Comparison of measured wave heights and computed wave heights, present study(blue solid line), measured wave heights(red solid line).

로 2배 이상 차이나고 있다. 그리고 최병호(2004)에 따르면, 거제도의 경우 파랑 관측 위치가 개방된 외해 측에 위치해 있어 유의파고가 다소 과소관측 되고 최대파의 최대값은 과대 관측 되는 경향이 있다. 이러한 거제도 인근 파랑자료의 기상특성을 고려할 때 만족스러운 결과로 판단된다.

Fig. 9는 부산 신항에서의 파랑 관측 결과와 본 연구 및 Choi et al.(2004)의 계산 결과를 나타낸 것이다. Fig. 9의 파랑 관측 결과는 한국해양연구원(2003)의 자료로서 유의파고의 최대값으로 8 m 가 관측되었지만 부산신항 동방파제에 의한 반사파 성분을 제외시키면 7.4 m 정도가 된다(한국해양연구원, 2003). 결과를 보면 본 모형이 약 1 m 정도 과소평가가 하고 있지만 반사파 성분을 고려할 때 양호한 모의결과로 판단된다. Choi et al.의 파랑 계산결

파는 SWAN을 적용하여 구한 값으로서 유의파고의 최대 값은 본 모형의 계산 결과가 관측치와 더 나은 일치성을 보여준다. 하지만 유의파고가 최대값에 도달하는 9월 12일 21시경까지는 반대로 Choi et al.의 계산 결과가 더 정확 한데 이는 유의파고가 최대값에 도달하는 시기가 태풍의 눈이 부산 신히 가까이 접근하여 풍향이 동풍에서 남풍 으로 바뀌는 시점으로서 가덕도에 의해 취송거리(Fetch)가 제한되어 본 연구의 계산 결과에서는 상대적으로 파랑이 적게 발달하여 나타나는 것으로 보여진다.

Fig. 10은 울산에서의 파랑관측 결과와 본 연구의 수치모의 실험 결과를 함께 나타낸 것으로서 최대값의 도달시기는 잘 일치하지만 약 1 m 정도 큰 파고를 보여주고 있다.

전체적으로 본 모형의 수치모의 결과가 관측 결과와 대체로 잘 일치하고 있으나, 유의파고의 최대값을 약 1 m 정도 과대산정하고 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 복합 파랑-해일 모형(Dynamically coupled wave-surge model) 개발연구의 일부로서, 심해와 천해에 따라 별개의 파랑모형을 적용해야하는 문제점을 해소하기 위해 기존의 심해 파랑모형 WAM의 적용영역을 천해로까지 확장하고 개발된 모형의 검증에 수행하였다. 추가된 천해효과는 쇄파와 삼파 상호작용이며, 근사 수심 대신 실제 수심값을 사용하여 수정하여 군속도 등의 계산에 정밀도를 높였다.

Chawla et al.(1998)의 수리모형 실험에 적용하여 굴절과 쇄파에 따른 파랑변형을 모의하였고 연산결과는 예측치와 양호한 일치를 보여주었다. 삼파 상호작용의 구현 및 특성 확인을 위해 Beji and Battjes (1993)의 수중잡제 수리실험에 적용하였다. 잠제 천단부에서 삼파 상호작용으로 인한 저주파수대에서 고주파수대로의 에너지 전달을 모의하였고 에너지 전달 주파수대의 위치 및 전달량 등은 실험치와 잘 일치하였다. 태풍 매미에 대한 천해역 태풍파랑 모의를 수행하였고 거제, 부산 신히, 울산에서의 파고 관측값과 비교하였다. 계산된 유의파고는 대체로 관측치와 일치하였으나 유의파고의 최대값을 약 1 m 정도 과대산정 하였다. 차후 본 수치모형을 해일모형과 결합하여 천해역에서의 파랑-해일 복합모의에 적용하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-

1177-0)와 건설교통부 지역특성화연구개발사업(C105E1020001-06E020200210)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 천제호, 안경모, 윤종태 (2006). 음해법을 이용한 WAM모형의 태풍 파랑 수치모의, 한국해양학회지, 18(4), 294-300.
- 최병호, (2004). 태풍 매미호에 의한 자연 재해, 한반도 해역의 고파, 폭풍해일 워크숍 논문집, 1-34.
- 한국해양연구원 (2003). 부산신히 해양수리현상 연구개발 영역, 한국해양연구원 연안항만공학연구본부
- Battjes, J.A. and Janssen, P.A.E.M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking random waves, Proc. 16th Int'l Conf. Coastal Eng., 563-587.
- Beji, S. and Battjes, J.A. (1993). Experimental investigation of wave propagation over a bar, Coastal Engineering, 19, 151-162.
- Chawla, A., Ozkan, H.T., and Kirby, J.T. (1998). Spectral model for wave transformation and breaking over irregular bathymetry, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 124(4), 189-198.
- Chen, Q., Zhao, H., Hu, K., and Douglass, L. (2005). Prediction of wind waves in a shallow estuary, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 131(5), 137-148.
- Choi, B.H., Eum, H.M., Kim, H.S., Jeong, W.M. and Shim, J.S. (2004). Wave simulations for typhoon Maemi, The 14th OMISAR workshop on ocean models, <http://ivy3.epa.gov.tw/OMISAR/Data/WOM14/Proceedings/p6.pdf>.
- Elderberky, Y. (1996). Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands.
- Lavrenov, I.V. (2004). Wind-waves in oceans, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Madsen, P.A., and Sorenson, O.R. (1993). Bound waves and triad interaction in shallow water, Ocean Engineering 20(4), 359-388.
- Monbaliu, J., Padilla-Hernandez, R., Hargreaves, J.C., Albiach, J.C.C., Luo, W., Sclavo, M., and Gunther, H. (2000). The spectral wave model, WAM, adapted for applications with high spatial resolution, Coastal Engineering, 41(1), 41-62.
- Sorenson, R.M. (1993). Basic wave mechanics for coastal and ocean engineers, John Wiley and Sons, Inc.

Received December 18, 2007

Accepted February 16, 2008