

음해법을 이용한 WAM모형의 태풍파랑 수치모의 Numerical Simulation of Typhoon-generated Waves using WAM with Implicit Scheme

천제호* · 안경모** · 윤종태***

Jeho Chun*, Kyungmo Ahn** and Jong Tae Yoon***

요 지 : 양해법의 하나인 풍상차분을 사용하는 WAM 모형의 수치기법을 분할차분법을 이용한 음해법으로 바꾸고 수치분산을 줄이기 위해 FCT 기법을 적용하였다. 새로운 수치기법의 특성을 확인하기 위해 구형파 전파실험과 태풍 매미로 인한 파랑모의를 수행하였다. 기존의 WAM 모형에 비해 현저히 수치분산을 줄일 수 있었고, 음해법의 이용으로 비교적 큰 시간 격자 간격에서도 안정적으로 계산이 수행되어, 보다 경제적인 수치모의가 가능함을 확인하였다.

핵심용어 : 태풍, 음해법, WAM, 파랑모형, 파랑스펙트럼

Abstract : Implicit numerical scheme using fractional step method and FCT is used to improve the computational efficiency of WAM. Square wave test and simulation of typhoon generated waves are conducted to verify the numerical scheme. The applied scheme shows much less numerical diffusion and due to the implicit character of the scheme much larger time steps can be used without numerical instability. For typhoon MAEMI, comparison between the numerical results and the measured data shows good agreement.

Keywords: typhoon, implicit scheme, WAM, wave model, wave spectrum

1. 서 론

1.1 WAM 모델

WAM은 WAMDI group(1988)에 의해 개발된 3세대 풍상스펙트럼 모형으로서 파랑모의를 위해 전 세계적으로 많이 쓰이는 모형 중 하나이다. 작용 보존방정식을 기본 식으로 사용하며 파랑의 굴절, 파랑의 생성, 백파(whitecapping) 및 바닥 마찰에 의한 에너지 감쇠, 4차 파랑 간섭 효과(quadruplet wave-wave interaction)등의 물리적 현상을 고려한다. WAM에서는 천해에서 주로 나타나는 파랑변형 현상인 파의 쇄파 및 3차 파랑간섭효과(triad wave-wave interaction)등을 고려하지 않아 천해에서 적용하기에는 부

적합하며, 주로 심해에서의 파랑변형을 수치 모의하는 데 사용된다.

WAM에서는 수치기법으로 1차의 풍상차분기법을 사용하고 있다. 풍상차분 기법은 단조(monotone)해서, 파랑스펙트럼이나 물질의 전달을 계산하는 데 유리하다. 하지만 양해법(explicit scheme)이므로 CFL 조건을 반드시 만족해야 한다. 그리고 CFL 조건을 만족한다고 하더라도 Courant 수가 작으면, 수치분산(numerical diffusion)이 많이 발생하여 정확한 파랑에너지 스펙트럼의 전달을 계산하는 데 불리하다. Tolman(1999)은 수치분산을 줄일 목적으로 Ultimate Quickest scheme을 적용하여 파랑 전달을 계산한 바 있다.

*한동대학교 건설환경연구소 (Jeho Chun, Institute of Construction and Environmental Research, Handong Global University, Pohang, Kyeongbuk, 791-708, Korea, eulia01@hotmail.com)

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

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

1.2 WAM의 개선에 관한 연구

최근까지 여러 연구자들에 의해 WAM의 성능이 개선되었다. 이들 연구를 소개하면 다음과 같다.

Li(1992)는 분할차분법(fractional step method)을 이용하여 정원살수효과(garden sprinkler effect)를 제거하는 방법을 보였다. 기존의 WAM에서도 분할차분법을 이용하여 파랑전달 계산 부분과 원천함수(source function)부분을 따로 계산하고 있다. Li는 기존의 WAM모형에서 파랑전달 계산 부분과 원천함수 계산 부분 사이에 살수효과를 제거하는 Booi and Holthuijsen(1987)의 분산 보정기법을 첨가시켰다.

Bender(1996)는 WAM을 이용하여 한 달간 호주 연안 파랑의 후방예측을 실시하였다. Bender는 WAM2와 WAM3를 동시에 적용하였는데, 진보된 파랑 생성 구조를 채택하고 있는 WAM3의 계산 결과가 더 부정확한 것으로 나타났다. 그리고 WAM3를 제한취송거리(fetch-limited) 수치실험에 적용하여 WAM3가 Pierson-Moskowitz 한계를 넘어서는 결과를 보이는 등 불안정한 연산을 수행하고 있음을 보였다. Bender에 의하면 이는 WAM3에서 채택하고 있는 파랑에너지 생성 구조에 기인한 것으로서, Janssen(1991)의 준 선형이론(Quasi-linear theory)이 기존의 풍파생성 구조와 달리, 초기해상(young sea)에 대해서도 고려하는 반면에, 후주 연안의 파랑은 성숙해상(old sea)이 지배적이기 때문에, 관측치보다 큰 계산 결과가 나타나고 있다. Bender는 이 문제를 해결하는 일환으로 백파에 의한 에너지 감쇠 항을 일부 조정하고, 3차의 풍상차분을 적용하여 WAM의 계산 능력을 향상시켰다. Bender가 제시한 백파에 의한 에너지 감쇠 항은 WAM cycle4에 있는 것과 동일한 형태이다.

Hardy et al.(2000)은 호주북동부 연안의 대보초해역(Great Barrier Reef)에 대한 풍파모의를 실시하기 위해서 WAM에 음해법을 적용하였다. 대보초는 호주북동쪽에 약 20,000 km²에 걸쳐 분포하는 해역으로서, 수심이 매우 급격하게 변화하는 특징을 가지고 있다. 따라서 이 지역에 대해 풍파모의를 하기 위해서는 매우 작은 시간 격자간격을 사용해야만 한다. 이에 Hardy et al.(2000)은 효과적인 수치모의를 위해서 음해법을 WAM에 적용하여 풍파모의를 실시하였다. 음해법으로 양해/음해기법(implicit/explicit scheme)을 적용하여, Courant 수가 1보다 작은 공간에 대해서는 양해법을 적용하도록 하여 기존의 2차의 음해법보다 진보된 수치기법을 사용하고 있다.

1.3 연구내용 및 방법

본 연구에서는 새로운 음해법으로 개량한 WAM을 이용

Table 1. Computational parameters by Phadke et al. (2003)

계산 조건의 종류	계산 조건
공간 격자 간격	6분 (1/10도) 이하
에너지 스펙트럼의 방향성분 갯수	48개 이상
에너지 스펙트럼의 주파수성분 갯수	25개 이상

하여 태풍파랑에 대해서 수치모의 하고자 한다. Phadke et al.(2003)은 민감도분석을 실시하여 태풍 파랑 수치모의의 실험에 적합한 WAM의 계산 조건을 아래의 Table 1과 같이 제시하였다.

WAM Cycle4에서는 위의 조건으로 동북아시아 지역에 대한 태풍 파랑을 수치모의하기 위해서는 매우 작은 시간 격자 간격(약 30초)을 사용하여야만 한다. Choi et al.(2004b)은 120초의 시간 격자간격으로 5분 공간격자를 가지는 동북아해역에 대해서 수치모의의 실험을 실시하였다. 사용한 파랑 에너지스펙트럼의 성분 개수는 주파수 및 방향별로 각각 25, 12개를 사용하였다. Choi et al.(2004b)의 계산조건은 Phadke 등이 제안한 것보다 작은 편이다. 하지만, Choi et al.(2004b)이 사용한 주파수 및 방향성분의 개수는 통상적으로 WAM에서 사용되는 계산조건으로서, 결코 작은 값을 사용한 것이 아니다(Monbalieu et al., 2000). 따라서 Phadke et al.의 계산 조건으로 WAM Cycle4를 동북아시아에 적용하여 태풍파랑을 수치 모의하는 것이 매우 비효율적임을 알 수 있다.

이에 본 연구에서는 효과적인 파랑모의를 위해 음해법을 WAM에 적용하여 파랑에너지의 전달을 계산하고자 한다. 본 연구에서는 ADI 기법과 마찬가지로 시간에 관계없이 안정적인(Lomax et al., 2004) 분할차분법을 적용하여 음해적으로 각 공간에 대해서 파랑의 전달을 계산한다. 분할차분법은 Hardy et al.(2000), Li(1992), Hsu et al.(2005)에 의해 풍파 스펙트럼의 수치기법으로 적용된 바 있으며 그 정확성을 이미 검증받았다. 본 논문에서는 각 공간에 대해서는 FCT(Flux-Corrected Transport)기법을 적용하여 수치분산을 줄이도록 도모하였다.

본 수치모형의 검증을 위해 구형파 실험을 통해 수치분산의 정도를 확인하였고 2003년에 발생한 태풍 매미에 적용하여 파랑관측 자료와 비교하였다.

2. 지배방정식 및 수치기법

2.1 지배방정식

WAM의 지배방정식은 파랑 에너지 스펙트럼 $F(\lambda, \phi, \sigma, \theta)$ 의 수송방정식(transport equation)으로 다음과 같다(Monbalieu

et al., 2000).

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

여기서,

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

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

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

λ, ϕ : 경위도

σ : relative frequency ($= \sqrt{gk \tanh kh}$)

θ : 스펙트럼의 방향

R : 지구의 반경

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

c_g : group velocity, $c_g = \partial \Omega / \partial k$

S : 원천함수, $S = S_\infty + S_{ds} + S_{nl} + S_{bf}$

S_∞ : 바람에 의한 에너지 증가

S_{ds} : 백파 등에 의한 에너지 감소

S_{nl} : 비선형 상호 작용

S_{bf} : 마찰에 의한 에너지 감소

2.2 수치기법

본 연구에서는 분할차분법을 이용하여 공간별로 음해적으로 파랑 에너지 스펙트럼을 계산하는 데, 수치 계산 식의 전개는 다음의 식 (2)-(6)과 같다.

$$F^{n1+} + \alpha \delta (\bar{c}_\sigma F^{n1+}) = F^n - \beta \delta (\bar{c}_\sigma F^n), \quad \bar{c}_\sigma = c_\sigma \frac{\Delta t}{\Delta \sigma} \quad (2)$$

$$F^{n2+} + \alpha \delta (\bar{c}_\theta F^{n2+}) = F^{n1+} - \beta \delta (\bar{c}_\theta F^{n1+}), \quad \bar{c}_\theta = c_\theta \frac{\Delta t}{\Delta \theta} \quad (3)$$

$$F^{n3+} + \alpha \delta (\bar{c}_\lambda F^{n3+}) = F^{n2+} - \beta \delta (\bar{c}_\lambda F^{n2+}), \quad \bar{c}_\lambda = c_\lambda \frac{\Delta t}{\Delta \lambda} \quad (4)$$

$$F^{n4+} + \alpha \frac{\delta (\bar{c}_\phi \cos \phi F^{n4+})}{\cos \phi} = F^{n3+} - \beta \frac{\delta (\bar{c}_\phi \cos \phi F^{n3+})}{\cos \phi}, \quad \bar{c}_\phi = c_\phi \frac{\Delta t}{\Delta \phi} \quad (5)$$

$$F^{n+1} = F^{n4+} + \frac{S(F^{n4+})}{1/dt - S_F(F^{n4+})} \quad (6)$$

여기서, δ : 본 연구의 수치차분 연산자

α, β : 계수, $0 < \alpha < 1, \beta = 1 - \alpha$

Δt : 시간격자간격, $\Delta \lambda, \Delta \phi$: 경위도상 공간격자 간격

$\Delta \theta$: 파랑 스펙트럼의 방향성분 격자 간격

$\Delta \sigma$: 파랑 스펙트럼의 주파수성분 격자 간격

위의 식 (2)-(5)는 파랑에너지의 전달을 계산하는 부분으로서 각 공간별로 음해적으로 파랑 스펙트럼을 계산한다. 식 (6)는 원천 함수를 적분하는 식인데, 기존의 WAM에서 사용하는 것과 동일한 수치기법을 사용한다. 생략(cancellation) 효과를 고려하여 기존의 WAM의 식에서 계수를 일부 수정하였다.

기존의 WAM에서는 원천함수의 식은 아래의 식 (7)과 같다.

$$F^{n+1} = F^{n4+} + \frac{S(F^{n4+}) dt}{1 - S_F(F^{n4+}) dt} \quad (7)$$

이 경우 위의 식은 시간 격자 간격이 클 때, 다음의 식 (8)와 같이 근사되어진다(Hargreaves and Anan, 2001; Lomax et al., 2004).

$$F^{n+1} = F^{n4+} - \frac{S(F^{n4+})}{S_F(F^{n4+})} \quad (8)$$

시간격자 간격이 클 때, 위의 식 (7)이 실제의 컴퓨터 연산에서 식 (8)로 변환되지는 않는다. 본 연구에서는 생략 효과를 고려하여 식 (7)의 분자와 분모를 시간격자 간격, dt 로 나눈 식 (6)와 같은 형태로 원천함수의 적분을 계산한다.

본 연구에서는 Lavrenov(2003)의 기법을 도입하여 정원살수 효과를 제거하였다. Lavrenov의 기법은 식의 형태가 간단하여 쉽게 적용할 수 있다. 국내에서는 Choi et al.(2004a)이 태풍 루사에 대한 태풍 파랑장을 모의하는데 사용한 적이 있다. Lavrenov의 정원살수 효과 제거 식은 다음의 식 (9)와 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \beta \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \quad (9)$$

여기서,

$$\beta = A \frac{(\Delta \theta)^2 C_g}{12R}$$

$\Delta \theta$: 파랑에너지스펙트럼의 방향성분 격자 간격

A : 계수

2.3 FCT 기법

FCT 기법은 Boris and Book(1973)이 처음 제안한 수치기법으로 물질이나 에너지의 전송을 정확하게 계산하는데 유리하다. 본 수치기법은 1차의 풍상차분 및 2차의 중앙차분 기법 등에 비해서 수치분산과 수치진동(numerical oscillation)이 많이 감소되는 특징을 가지고 있다. 본 수치기법은 해

Table 2. FCT의 적용단계

단 계	내 용
1단계	low order method (1st order upwind scheme)을 이용하여 flux, $F_{i+1/2}^L$ 을 계산한다.
2단계	high order method (2nd order centered scheme)을 이용하여 flux, $F_{i+1/2}^H$ 을 계산한다.
3단계	antidiffusive flux, $A_{i+1/2}$ 를 계산한다. $A_{i+1/2} = F_{i+1/2}^H - F_{i+1/2}^L$
4단계	1단계에서 정의된 low order flux를 이용하여 물질의 전송량, q_i^{td} 을 계산한다. $q_i^{td} = q_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^L - F_{i-1/2}^L)$
5단계	다음과 같은 식을 통해서 limited antidiffusive, $A_{i+1/2}^C$ 를 계산한다. $A_{i+1/2}^C = S \max(0, \max(A_{i+1/2} , S(q_{i+2}^{td} - q_{i+1}^{td}) \frac{\Delta x}{\Delta t}, S(q_i^{td} - q_{i-1}^{td}) \frac{\Delta x}{\Delta t}))$ 여기서, $S = \text{sign}(A_{i+1/2})$ $\text{sign}(x)$: x의 부호값
6단계	5단계에서 계산한 limited antidiffusive flux로 최종의 물질의 전송량을 계산한다. $q_i^{n+1} = q_i^{td} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (A_{i+1/2}^C - A_{i-1/2}^C)$

양 및 대기과학 분야에서 물질의 전송을 계산하는 데 사용되거나, 군사 분야에서 폭발현상의 수치모의에 사용되고 있다. 수치기법의 계산 과정은 다음의 식 (10)과 같은 보존방정식을 대상으로 다음과 같이 설명할 수 있다.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \tag{10}$$

위의 식 (11)을 유한차분기법으로 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$q_i^{n+1} = q_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2} - F_{i-1/2}) \tag{11}$$

다음의 Table 2와 같은 과정을 통해서 FCT를 적용한다.

2.4 수치기법의 정확도

본 연구에서 파랑에너지 스펙트럼의 전달을 계산할 때 사용하는 계산법인 FCT는 다른 수치기법보다 수치분산이 적어 정확한 파랑에너지의 전달을 계산하는 데 유리하다. 본 수치기법의 정확도는 구형파(square wave) 실험을 통해서 간단하게 파악할 수 있다.

구형파 수치실험은 Boris and Book(1973)이 FCT의 정확도를 보기 위해 도입한 수치실험으로 본 연구의 수치기법에서 발생하는 수치분산의 정도를 쉽게 파악할 수 있다. 본 논문에서는 Courant 수가 0.5, 1, 1.5, 2인 경우에 대해서 구형파 실험을 실시하여 그 결과를 다음의 Fig. 1~Fig. 4에 나타내었다. Fig. 1~Fig. 4에는 본 연구의 기법뿐만 아니라, Hardy *et al.*(2000)의 양해/음해기법과 해석해를 함께

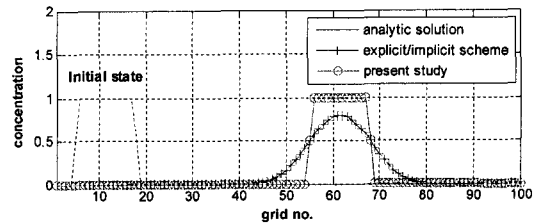


Fig. 1. Results of square-wave test, Courant number=0.5.

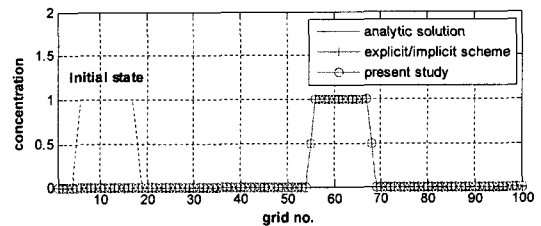


Fig. 2. Results of square-wave test, Courant number=1.

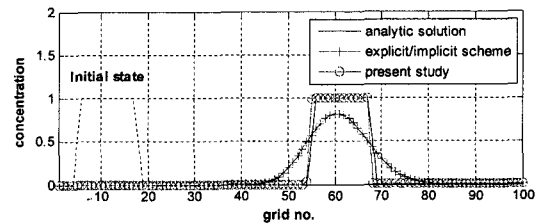


Fig. 3. Results of square-wave test, Courant number=1.5.

나타내었다.

Courant 수가 1인 경우는 두 가지 수치해가 모두 해석해와 일치하고 있다. 하지만, Courant 수가 1과 다를 경우에

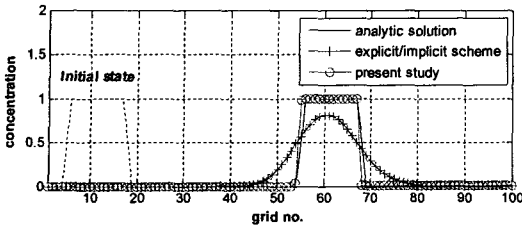


Fig. 4. Results of square-wave test, Courant number=2.

는 수치해석 결과들과 해석해 사이에 차이가 난다. Courant 수가 0.5, 1.5, 2인 경우, 양해/음해기법의 계산 결과에서는 수치 분산이 발생하여 원래의 사각형 형상이 종모양의 분포를 보이고 있다. 이와는 반대로, 본 연구의 수치 기법을 적용한 경우에는 원래의 형태를 거의 유지하고 있다. Courant 수가 1보다 클 경우 본 연구의 수치 기법에서도 부분적으로 수치 분산이 발생하고 있지만 그 크기는 미소함을 볼 수 있다. 본 FCT 기법으로 파랑 스펙트럼의 수송을 충분히 정확하게 모의할 수 있는 것으로 판단된다.

3. 현장 적용

3.1 계산 조건

본 연구의 수정 WAM 모형을 2003년도에 발생한 태풍 매미에 적용한 후, 계산 결과를 현장 관측 자료와 비교하여 검증하였다. 수치모의 실험의 수심 격자는 미국 NOAA에서 제공하는 ETOPO5 Database에서 동북아시아 부분을 추출해 사용하였다. 수심 격자의 등고선을 이어도 해양관측 가지의 위치와 함께 다음의 Fig. 5에 나타내었다.

본 수치모의 실험의 바람장은 한국 기상청의 RDAPS의 계산결과에서 일부 영역을 추출한 것을 이용한다. 이 바람장은 Choi *et al.*(2004b)이 태풍 매미 때의 태풍 파랑을 수치모의하기 위해 사용한 바 있다.

본 수치모의 실험에서는 Phadke *et al.*(2003)의 제안을 따라 다음과 같은 계산 조건들을 사용하였다. 공간 격자 간격은 위경도는 모두 5분 간격(≈0.93 km, 적도기준)을 사용한다. 그리고, 파랑 스펙트럼의 주파수 및 방향별 성분 개수로 각각 25개, 48개 등을 사용한다. 그리고, 시간 격자 간격으로 10분을 사용하며, 2003년 9월 11일 3시경부터 2003년 9월 13일 21시까지에 총 66시간에 대해서 수치모의 실험을 실시하였다. 이 때, 각 공간별 CFL number를 다음의 식 (11)에 나타내었다.

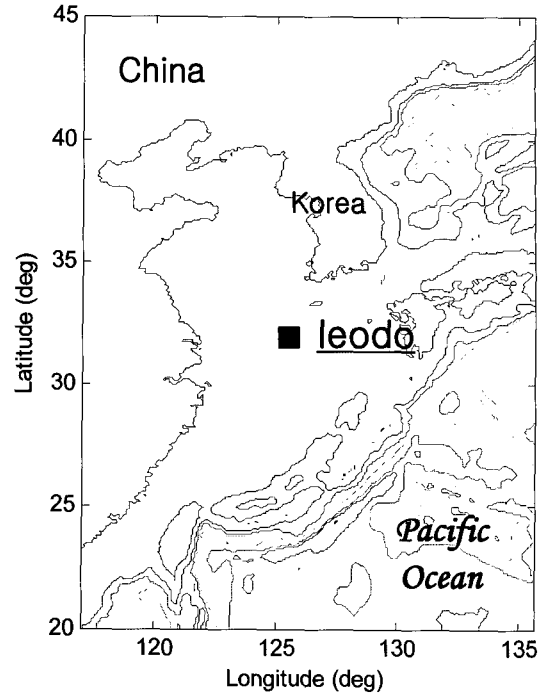


Fig. 5. Bathymetry for numerical simulation of typhoon MAEMI.

$$\left|c_{\theta} \frac{\delta t}{\delta \theta}\right| \approx 7.5, \left|c_{\lambda} \frac{\delta t}{\delta \lambda}\right| \approx 1.8, \left|c_{\phi} \frac{\delta t}{\delta \phi}\right| \approx 1.8 \quad (11)$$

여기서, δt : 시간 격자 간격, $\delta \lambda$: 경도의 공간 격자 간격, $\delta \phi$: 위도의 공간 격자 간격

3.2 계산 결과 및 고찰

계산 결과 얻은 유의 파고를 다음의 Fig. 6에 시간별로 나타내었다. 그림을 보면, 대만 동쪽 방면에서 태풍에 의해 생성된 높은 파랑이 태풍의 경로를 따라 북상하여 대한해협을 경유해, 동해로 빠져 나가는 것을 볼 수 있다. 이는 태풍의 이동에 따라 파랑이 발생, 전파하는 것으로 태풍에 의해 발생하는 파랑의 패턴을 잘 나타내고 있다.

이러도 해양과학 기지에서 관측한 관측 자료와 계산 결과를 비교하여 다음의 Fig. 7에 나타내었다. 한국 해양 연구원에서는 두 종류의 파고계를 설치하여 태풍 파랑을 관측하였다(심 등, 2004). 아래의 그림에서 보면, 부이형 파고계와 레이더형 파고계에 의한 유의파고의 관측결과에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 레이더형 파고계가 아직 정확도가 검증되지 않았음을 생각할 때 부이형 파고계가 보다 정확한 것으로 생각되며, 본 연구에 의한 유의파고의 수

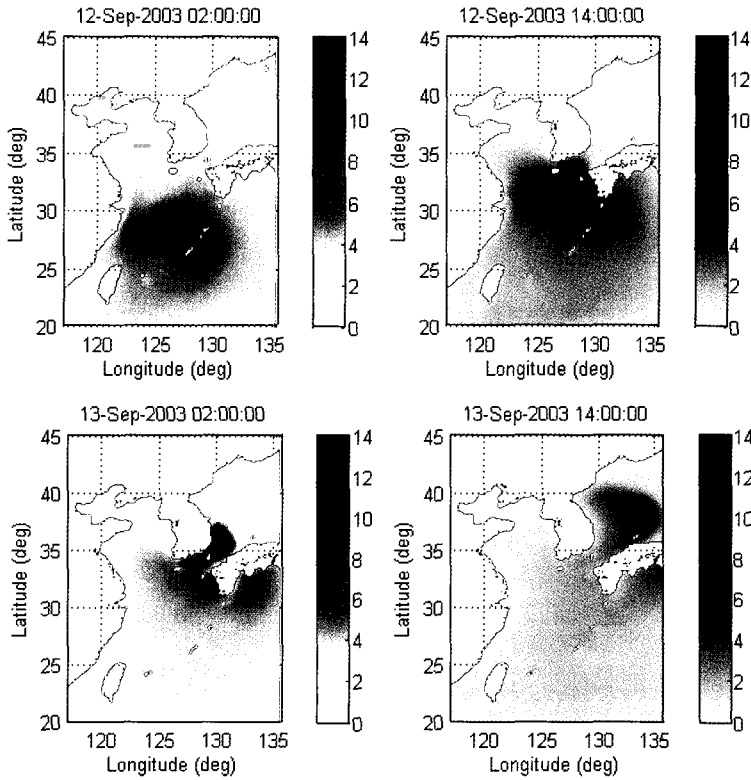


Fig. 6. Distribution of significant wave height, unit: meter.

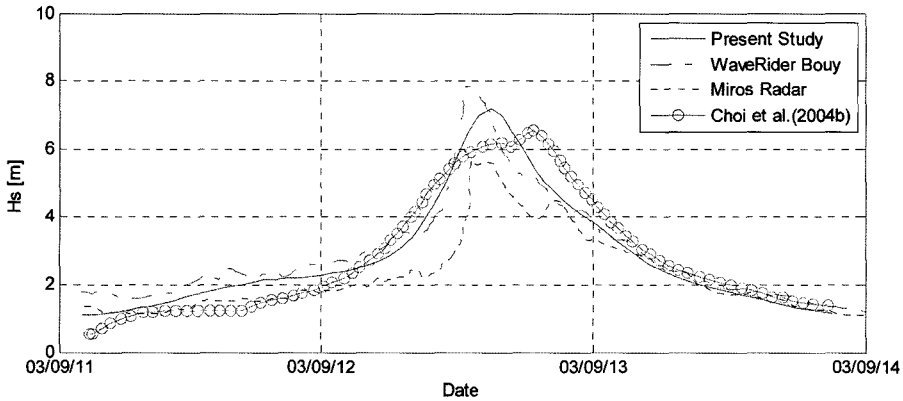


Fig. 7. Comparison between measured data and computed results.

치모의 결과는 부이형 파고계에 의한 유의파고와 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 WAM Cycle4의 수치기법을 분할차분법을 이용한 음해법으로 파랑스펙트럼을 계산하도록 수정하

였다. 또한 수치분산을 줄이기 위해 FCT 기법을 적용하였다. 음해법을 적용한 결과, 비교적 큰 시간 격자 간격에서도 파랑 스펙트럼의 계산이 안정적으로 수행되어 연산시간이 문제가 되는 실 해역에서의 파랑모의에 효율적으로 운용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 FCT 기법을 활용함으로써 기존의 풍상차분 기법이 보여주던 과도한 수치분산을 상당부분 제거할 수 있었다.

본 수치모형을 2003년에 발생한 14호 태풍 매미에 적용하여 정확성을 검증하였다. 1보다 큰 Courant 수를 가졌음에도 불구하고 계산 결과는 현장 관측 자료와 잘 일치하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-11177-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- 심재설, 이재학, 민인기 (2004). 이어도 해양과학기술기지에서의 관측한 태풍매미자료의 분석, 한반도 해안의 고파, 폭풍해일 워크숍 논문집, 49-54.
- Bender, L.C. (1996). Modification of the physics and numerics in a third-generation ocean wave model, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13, 726-750.
- Booij, N. and Holthuijsen, L.H. (1987). Propagation of ocean waves in discrete spectral models, *Journal of computational physics*, 68, 307-326.
- Boris, J.P. and Book, D.L. (1973). Flux-corrected transport: I. SHASTA, a fluid transport algorithm that works, *Journal of computational physics*, 11, 38-69.
- Choi, B.H., Eum, H.M., Kim, H.S., and Lavrenov, I.G. (2004a). Coupled storm surge and wave simulation for neighboring seas of Korea peninsula, *Workshop on Wave, Tide Observations and Modellings in the Asian-Pacific Region*, 173-209.
- Choi, B.H., Eum, H.M., Kim, H.S., Jeong, W.M. and Shim, J.S. (2004b). Wave-tide-surge coupled simulation for typhoon Maemi, *Workshop on waves and storm surges around Korean peninsula*, 121-144.
- Hargreaves, J.C. and Annan, J.D. (2001). Comments on "Improvement of the Short-Fetch Behavior in the Wave Ocean Model(WAM)", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(4), 711-715.
- Hardy, T.A., Mason, L.B. and McConochie, J.D. (2000). A wave model for the Great Barrier Reef, *Ocean Engineering*, 28(1), 45-70.
- Hsu, T.W., Ou, S.-H. and Liao, J.-M. (2005). Hindcasting near-shore wind waves using a FEM code for SWAN, *Coastal Engineering*, 52(2), 177-195.
- Janssen (1991). Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting, *Journal of Physical Oceanography*, 19, 745-754.
- Lavrenov, I.G. (2003). Wind-waves in oceans: dynamics and numerical simulations, Springer-verlag Berlin Heidelberg.
- Li, C.W. (1992). A split operator scheme for ocean wave simulation, *International journal for numerical methods in fluids*, 15, 579-593.
- Lomax, H., Pulliam, T.H. and Zingg, D.W. (2004). *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*, Springer-Verlag.
- 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.
- Phadke, A.C., Martino, C.D., Cheung, K.F. and Houston, S.H. (2003). Modeling of tropical cyclone winds and waves for emergency management, *Ocean Engineering*, 30(4), 553-578.
- Tolman, H.L. (1999). User manual and system documentation of WAVEWATCH_III version 1.18, U.S. Department of Commerce, NOAA, NWS, NCEP.
- The WAMDI group, Hasselmann, S., Hasselmann, K., Bauer, E., Janssen, P.A.E.M., Komen, G.J., Bertotti, L., Lionello, P., Guillaume, A., Cardone, V.C., Greenwood, J.A., Reistad, M., Zambresky, L. and Ewing, J.A., 1988. The WAM model - a third generation ocean wave prediction model, *Journal of Physical Oceanography*, 18, 1775-1810.

Received October 20, 2006

Accepted November 20, 2006