

## 제3세대 파랑추산모형을 이용한 태풍매미의 극한파랑 재현 (I)

- WAM 모형의 파향격자 분할법 및 파 발달 제한조건의 수정 -

신승호\* · 홍기용\*\* · 최학선\*\*\* · Noriaki Hashimoto\*\*\*\*

\*, \*\*, \*\*\*한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양개발시스템연구본부, \*\*\*\*일본 항만공항기술연구소 해양·수공부

### Reproduction of Extreme Waves Caused by Typhoon MAEMI with Wave Hindcasting Method, WAM ( I )

- Corrections of directional spreading division and limitation on wave development of WAM model -

Seung-Ho Shin\* · Key-yong Hong\*\* · Hark-Sun Choi\*\*\* · Noriaki Hashimoto\*\*\*\*

\*, \*\*, \*\*\* Ocean development system research Div., Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KORDI  
\*\*\*\* Department of Marine environment and Engineering, Port and Airport Research Institute, 239-0826, Japan

**요 약 :** WAM 모형은 대양의 파랑추산에 있어서 높은 정밀도를 가지고 있으면서도 타 모형에 비해 상대적으로 간결한 구조를 가지고 있어 국내외 많은 연구자들이 널리 활용하고 있으나, 모형의 특성상 심해·광역조건과 더불어 비교적 큰 격자에 적합하도록 설계되어 있고 파향의 격자 분할 방법으로 인해 경우에 따라서는 예기치 못하는 계산 결과를 산출하기도 한다. 본 연구에서는 WAM Cycle 4 모형을 대상으로 이 같은 문제점을 상세히 검토하고 관련 내용을 수정하여 천해·상세 해역에 대한 적용성을 확장하였으며, 수정된 WAM 모형은 이어도 해양과학기술지에서 관측한 2003년 9월 한 달 동안의 정밀 파랑관측 자료를 토대로 검증하여 그 타당성을 확인하였다.

**핵심용어 :** 제3세대 파랑추산모형(WAM), 파향의 격자분할, 상세 격자, 태풍 매미, 이어도 해양과학기술지

**Abstract :** The WAM wave model has been widely used for wave hindcasting in the ocean by many domestic and foreign researchers due to its relative simplicity and high accuracy. As this model was originally developed for the condition of deepwater and comparatively coarse grid size covering wide area, it might produce in a fault result caused by the improper distribution of directional spreading. We extensively investigated involved problems based on WAM Cycle 4 model and suggested the improved WAM model so that it is applicable to both shallow water sea and fine mesh wave simulation. The modified WAM model is verified here by comparing the computed result with and the observed data at Ieodo Ocean Research Station for September of 2003.

**Key words :** Third generation wave model(WAM), Grid arrangement of wave direction, Fine mesh, Typhoon MAEMI, Ieodo Ocean Research Station

## 1. 서 론

해양개발, 항만 건설, 선박의 운항, 조업 등과 같은 해양 공간을 무대로 한 인간의 활동에 있어서 가장 직접적이고 일차적인 위협 요소는 파랑이라 할 수 있으며, 때문에 대양 및 연안 해역의 파랑정보 획득을 위한 다각적인 노력을 해왔다.

일반적으로 대양에서 파랑 정보는 주로 부이와 해양 관측위성을 활용한 관측으로 얻어지고 있으며 연안 해역의 파랑 정보는 관측부이 외에도 해저 설치형 파랑관측기, 파랑관측용 레이더 등 다양한 형태로 얻어지고 있다.

하지만, 파랑 정보 획득을 위한 이와 같은 방법은 관측기가 설치되어 있는 해당 해역의 좁은 해역 내에 국한되어 유효

하므로, 관측기기가 상시 설치되어 있지 못한 해역에 대해서는 필요에 따라 일정 기간 임시로 설치하여 해역의 파랑 정보를 획득하고 있는 실정이다.

연안 해역의 파랑 정보는 해당 해역 주변에서의 항만 건설 혹은 해양 사업의 실시에 있어서 특히 중요한 요소이며 이 경우 관련 구조물의 내파 설계 등을 위해 극한파랑에 대한 정보가 요구된다. 그러나 실제 해역에서의 파랑 관측의 경우, 극한 파랑의 내습에 의해 관측기기 자체가 파손 혹은 유실되어 정작 추출되어야 할 극한 파랑의 정보는 결측되는 현상이 빈번하여(한동대, 2004) 애써 획득한 전체 자료의 가치를 약화시키는 사례도 적지 않다.

최근 WAM(WAMDI, 1988; Koman *et al.*, 1994)으로 대표

\* 대표저자 : 신승호(중신회원), shinsh@kriso.re.kr 042)868-7584

\*\* 중신회원, kyhong@kriso.re.kr, 042)868-7511

\*\*\* 정회원, hschoi@kriso.re.kr, 042)868-7510

\*\*\*\* hashimoto@pari.go.jp, +81-46-844 5049

되는 제3세대 파랑추산법에 의해 대양에서는 고정밀도의 파랑 추산이 가능하게 되었으며, 신·Hashimoto(2003)는 과거의 선박 침몰 사건에 대한 해상 상황을 재현함으로써 대양에서의 정밀도를 검증한 바 있다. 같은 정밀도의 제3세대 모형으로는 미국 NOAA에서 개발된 WAVEWATCH III(Tolman, 2002), 일본 기상청의 MRI III(植野·伊阪, 1997), 일본 기상협회의 JWA3G(Suzuki, 1995) 등이 있으며, WAM 모형을 토대로 확장된 천해역 파랑추산모형(SWAN)도 제안되어 있다(Holthuijsen *et al.*, 2000).

WAM 모형은 대양의 파랑추산에 있어서 높은 정밀도를 가지고 있으면서도 타 모형에 비해 상대적으로 간결한 구조를 가지고 있어 국내외 많은 연구자들에 의해 주목받고 있으나, 모형의 특성상 심해·광역조건과 더불어 비교적 큰 격자에 적합하도록 설계되어 있고(Hersbach and Janssen, 1998), 파향의 격자 배치 방법으로 인해 경우에 따라서는 예기치 못하는 계산 결과를 산출하기도 한다(增田·小松, 2000).

본 연구에서는 WAM Cycle 4 모형을 대상으로 이 같은 문제점을 상세히 검토하고 관련 내용을 수정하여 천해·상세 해역에 대한 적용성을 확장하였으며, 수정된 WAM 모형은 이어도 해양과학기술기지에서 관측한 2003년 9월 한 달 동안의 정밀 파랑 관측 자료를 토대로 검증하여 그 타당성을 확인하고자 하였다.

## 2. 제3세대 파랑추산모형의 수정

WAMDI Group(1988)에 의해 개발된 제3세대 파랑추산모형(WAM)은 그 후에도 많은 개량을 더하여 현재는 WAM Cycle 5(Hersbach, 1998)로 불리는 모형이 최신이지만, Cycle 5는 Cycle 4 모형에 데이터 동화기법(同化技法)을 추가한 모형으로서 기본적인 구조는 Cycle 4모형과 동일하다.

WAM에서는 직교 좌표계와 구면 좌표계에 대한 2개의 기초 방정식이 마련되어 있으나 식의 골자는 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다(식의 상세는 Komar *et al.*, 1994 참조).

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \mathbf{C}_g \cdot \nabla E = S_{in} + S_{ds} + S_{bf} + S_{nl} \quad (1)$$

여기서,  $E \equiv E(\omega, \theta, x, y, t)$  는 에너지 스펙트럼 밀도로서  $x, y$ 는 동측, 북측 좌표,  $t$ 는 시간,  $\omega$ 는 각진동수,  $\theta$ 는 파향(전파해 가는 방향) 그리고  $\mathbf{C}_g$ 는 군속도 벡터를 나타낸다. 식의 우변은 에너지 소스항으로서  $S_{in}$ 은 Janssen(1991)의 준선형 이론(quasi-linear theory)에 기초하여 바람으로부터 파로 전달되는 에너지 수송을 표현한 항,  $S_{ds}, S_{bf}$ 는 실험과 경험식을 바탕으로 각각 쇄파와 해저마찰에 의한 에너지 소산을 표현한 항이며  $S_{nl}$ 은 Hasselmann *et al.*(1985)이 제시한 성분파간의 비선형 상호작용에 의한 에너지 교환을 나타내는 전달함수이다.

식 (1)과 같은 에너지 전달에 관한 수치처리 방법은 평범한 문제에 속하며 역으로 말하면 이류항( $\nabla E$ )의 일반적인 처리

법은 넓은 응용이 있을 수 있다. 하지만 여기서 다루는 미지량은 파랑 성분의 스펙트럼 에너지로서 결코 음(-)이 되지 않는 성질이 있으므로, WAM 모형에서는 음이 되지 않는 성질을 가지며 수치 확산을 내재하여 안정성이 우수한 1차 풍상차분법을 채택하고 있다.

### 2.1 파향 격자 배치의 수정과 garden sprinkler effect의 완화

WAM 모형에서는 초기 설정값으로서 파랑 스펙트럼의 주파수 간격을 배율 1.1로 한 대수(log)로 25분할, 0~360° 파향 영역을 12분할로 하여 계산하도록 되어 있다. 여기서 우선 문제는 파향의 계산을 분할된 영역으로 이산화 하여 처리한다는 것에 있다. 이는 이차원 전파의 고유한 문제로서 garden sprinkler effect라 불리는 것이다. 즉 Fig. 1에 나타난 것처럼 초기에 공간 격자 상의 한 지점에 동일 주파수로 전 12방위의 파향에 동일한 초기 등방성(等方性) 에너지 분포를 설정하더라도 파향을 이산화 하여 처리함으로써 인해 원거리로 갈수록 에너지가 전혀 도달되지 못하는 영역이 확장되어 등방성의 올바른 파랑 전파를 표현할 수 없는 문제가 나타나는데 이를 garden sprinkler effect라고 한다(增田·小松, 2000, 참조).

增田·小松(2000)은 간략한 에너지 평형 방정식의 이류항에 대해 1차 풍상차분법 보다 고정밀도이며 수치 확산이 적은 Lax-Wendroff법, 혼합 3차 풍상차분법, CIP법, RIAM II법, FFTsqrt법 등의 수치기법에 따른 수치 확산과 garden sprinkler effect 정도를 함께 검토하여, 수치 확산이 가장 작은 FFTsqrt법에서 가장 현저히 나타남을 보였다. 결국 수치 확산이 많은 1차 풍상차분법을 도입하는 것이 오히려 이러한 garden sprinkler effect를 다소 약화시키는 경향을 보이기는 하지만, 이류항 수치기법의 수치 확산으로 이를 근본적으로 억제할 수 없음을 명백히 하였다.

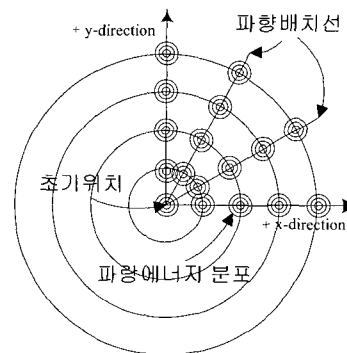


Fig. 1 Conceptual diagram of garden sprinkler effect

Fig. 2, 3은 태풍 매미에 대한 파랑추산결과(2003년 9월 1일~30일)의 한 예로, 태풍매미가 부산을 통과한 9월 12일 12시(UTC)의 유의파고 분포를 나타낸 것으로서 매 6시간 간격으로 각 격자점에 해상풍을 부여하며 계산한 결과이다. 이때 파랑의 계산은 보다 상세한 파향 분할을 통해 파향의 분해능

을 높이고자 16분할로 하였으나, 분할된 파향  $\theta_i$ 의 격자 배치는 WAM 모형의 원형 즉 동측으로 진행하는  $\theta_1=0$ 으로부터 시작하여 식 (2)와 같은 파향의 격자배치로 하였다.

$$\theta_i = \frac{2\pi}{16}(i-1), \quad (1 \leq i \leq 16) \quad (2)$$

WAM 모형의 원 파향 설정치 계산 결과인 Fig. 2, 3에서 점선의 원으로 표시한 부분은 상기 언급한 garden sprinkler effect로 인해 유의파고와 평균 주기의 분포에서 일부 동서 방향( $x$ 방향) 및 남북 방향( $y$ 방향)에 이방성(異方性)이 나타난 전형적인 예이다. 이와 같이 실제 계산에 있어서 해역의 파랑을 추산할 경우는 계산 영역 내의 각 공간 격자 상에서 시시각각으로 풍향 및 풍속이 변화하는 해상풍을 입력으로 하여 그에 따른 파랑의 발달 과정을 연속적으로 추산하게 되므로, 각 계산 단계에서 형성된 이방성(異方性)이 다소 희석되는 결과를

나타내기도 하지만 모든 계산 과정에서 소멸되지는 못함을 그림에서 확인할 수 있다.

WAM 모형에서 이와 같은 파의 전파에 따른 이방성(異方性)이 나타난 이유는, 이류항에 1차 풍상차분기법을 사용하고 있으므로 진동향(眞東向)의 파는 동서 방향으로 큰 수치 확산을 받게 되지만 남북 방향으로는 수치 확산을 받지 않고, 이와는 달리 진북향(眞北向)의 파는 남북 방향으로는 수치 확산을 받지만 동서 방향으로는 수치 확산을 받지 않는 점에 있다. 한편, 북북동과 동북동의 방향은 동서로도 남북으로도 수치 확산을 받는다. 즉 파의 전파를 수치 처리함에 있어서 공간 격자를 따라 수치 확산을 달리 일으키는 수치 처리가 원인이 되어 동서, 남북 방향으로 인위적인 이방성(異方性)이 나타나게 된 것이다. 본 연구에서는 WAM 모형에서 이 같은 이방성을 완화하기 위하여 増田·小松(2000)의 검토를 참고로 공간 격자에 연한 방향을 피하도록 다음과 같이 파향 배치를 수정하였다.

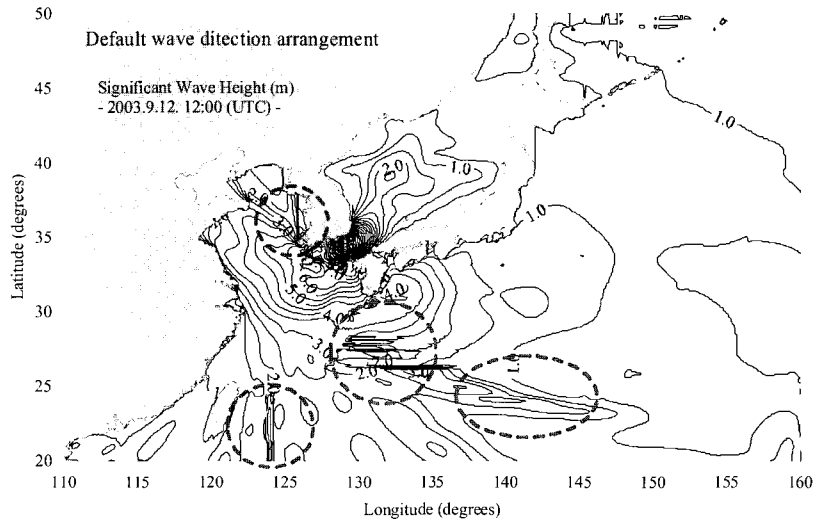


Fig. 2 An example of garden sprinkler effect (significant wave height distribution)

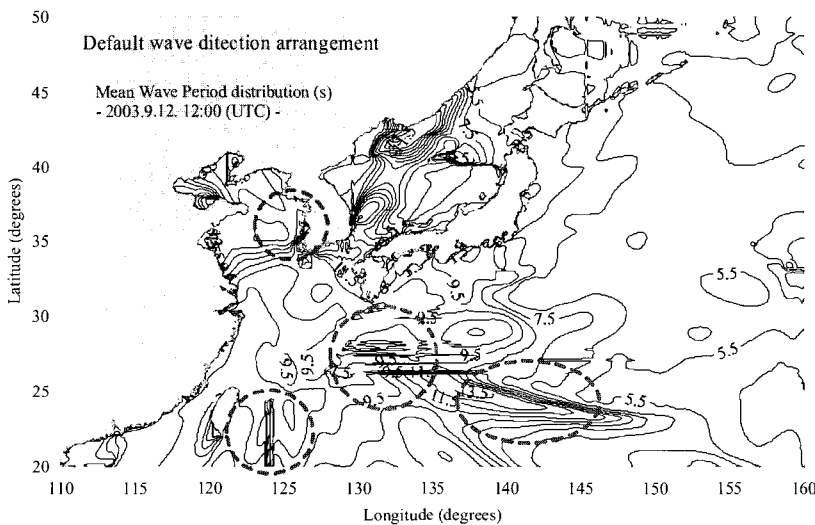


Fig. 3 An example of garden sprinkler effect (Mean wave period distribution)

$$\theta_i = \frac{2\pi}{16} \left( i - \frac{3}{2} \right), \quad (1 \leq i \leq 16) \quad (3)$$

Fig. 4, 5는 Fig. 2, 3과 완전히 동일한 계산 조건으로 설정하고 파향의 배치만을 수정한 결과이다. 점선의 원으로 표시한 영역은 Fig. 2, 3의 결과에서 garden sprinkler effect로 인해 이방성(異方性)이 나타났던 영역으로서, 본 계산에서는 에너지 전파의 이방성이 형성되지 않음을 알 수 있으며, 이로써 경사형 파향 배치가 어느 정도 garden sprinkler effect를 억제하는 역할을 한다고 할 수 있다.

### 2.2 파 발달에 대한 제한의 수정

WAM 모형은 대양의 파랑추산에 있어서는 많은 실적을 가지고 있으나(예를 들면 신·Hashimoto, 2003) 천해역의 상세 격자에 대한 적용 예는 그다지 많지 않다. 이는 WAM 모형에 포함되어 있는 몇 가지 파라미터가 대양의 파랑 추산에 적합

하도록 조정되어 있어 연안역의 상세 격자에 적당하지 않기 때문이다. 이와 같은 파라미터의 하나로서 파 발달에 대한 제한(limiter)이 있다. 이 제한은 파랑 스펙트럼의 고주파 성분에 대하여 단위 시간당 파랑 에너지의 증분( $\Delta E$ )에 상한을 설정하여 수치적인 발산을 억제하기 위해 도입된 파라미터로서 제한이 크게 설정될수록 파의 발달이 억제되며, 원래의 WAM Cycle 4에서는 다음과 같이 주어져 있다.

$$|\Delta E|_{\max} = 6.4 \times 10^{-7} g^2 f^{-5} \Delta t / \tau, \quad \tau = 1200s \quad (4)$$

間瀬 등(2001)은 이와 같은 파라미터가 도입된 WAM 모형을 상세한 시간 및 공간 격자에 적용하면 파랑이 충분히 발달하지 못하여 비현실적인 결과가 됨을 보고하였다. Hersbach and Janssen(1998)은 0.5° 공간 격자로 ECMWF에서 운용 중인 WAM 모형에서는 만족할만한 결과를 도출하지만, 상세한 해상도의 공간 격자(따라서 작은 계산 시간 격자)로의 적용을 위

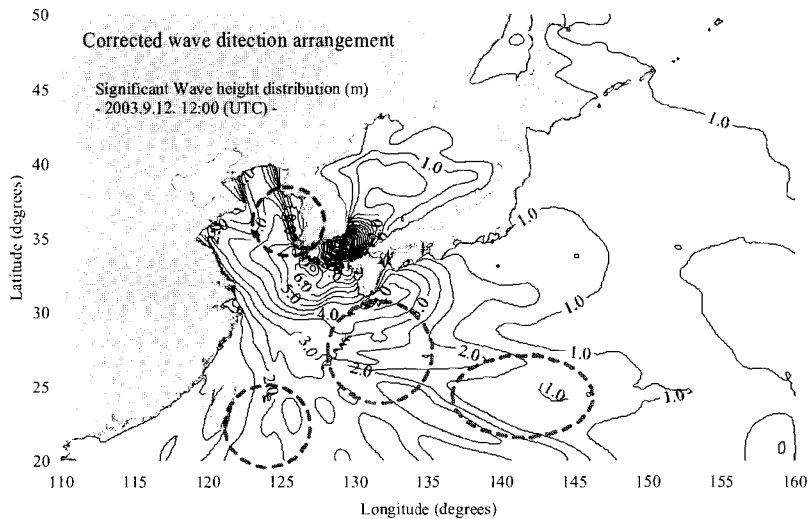


Fig. 4 Calculated result of wave height distribution by using corrected wave direction arrangement

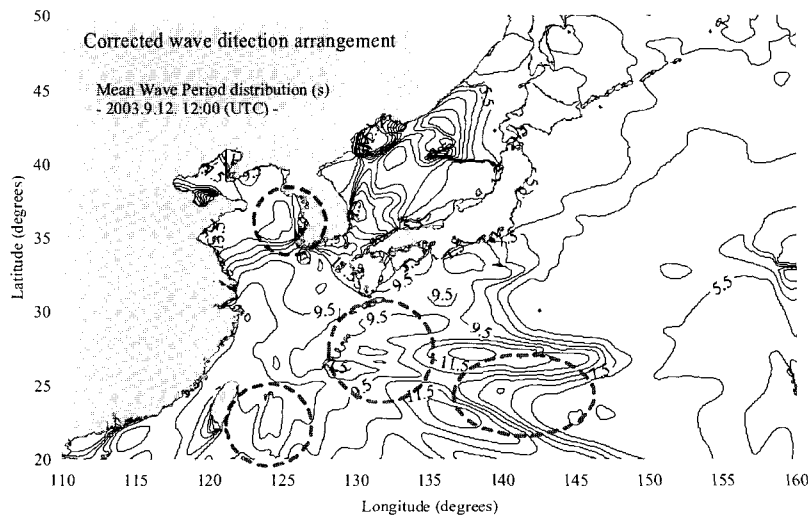


Fig. 5 Calculated result of mean wave period distribution by using corrected wave direction arrangement

해서는 마찰 속도  $u^* (= U_{10}\sqrt{C_D}, C_D$ ; 해면의 저항계수)의 스케일에 맞추어 제한(limitation)을 새로이 수정해야 함을 언급하였다.

천해 및 연안 해역에서의 파랑 추산을 위해서는 주변 지형의 영향으로 인해 변형되는 해상풍이 입력으로 주어져야 할 뿐만 아니라, 해역의 특정 지점에서의 파랑을 정밀하게 추산하기 위해서는 해당 해역의 지형에 대한 상세한 공간 격자의 해상도가 요구되며 그에 맞추어 계산 시간 간격도 조밀해 진다. 본 연구에서는 천해·연안 해역으로의 WAM 모형 적용성 확장을 위해 Hersbach and Janssen(1998)에 의한 제안을 도입하여 다음과 같은 식 (4)의 개량식을 적용하였다.

$$|\Delta E|_{\max} = 3.0 \times 10^{-7} g^2 \widetilde{u}^* f^{-4} f_c \Delta t \quad (5)$$

여기서,  $\widetilde{u}^* = \max(u^*, g f_{PM} / f)$ 이고,  $f_{PM} = 5.6 \times 10^{-3}$ 로서  $g/u^*$ 로 무차원화된 Pierson-Moskowitz 정점 주파수,  $f_c$ 는 차단 주파수(cutoff frequency)이다. 식 (5)는 종래의 제한에 있어서  $f^{-5}$ 로 도입되었던 고주파 대역의 Phillips 평형 스펙트럼 형상을 보다 적절한 스펙트럼 형상인 마찰속도  $u^*$ 에 비례하며  $f^{-4}$ 로 대표되는 Toba 스펙트럼형으로 변화한 것이며, 식 (4)의 상수  $\tau$ 를 삭제하여 시간 간격의 효과가 직접 반영하도록 한 것이다. 또한 식 (5)에서 나타내는 바와 같이  $u^*$ 를 최소치로 설정한 것은 바람이 작은 상황에 대한 배려가 내포된 것으로서, 이 경우 제한(limiter) 자체가 zero에 근접하여 특히 너울이 소산되는 것을 막는 효과를 나타내게 되므로 상세 격자 (즉 조밀한 시간 간격)에 대한 계산에 있어서 파랑이 충분히 발달하지 못하는 현상을 방지하게 된다.

### 3. 관측치와의 비교를 통한 개량 모형의 검증

#### 3.1 이어도 해양과학기지의 파랑관측 개요

이어도 해양과학기지(이하, 이어도 관측기지)는 우리나라 최초의 고정식 해양 구조물로 건설된 종합해양관측기지로써 2003년 준공을 마치고 현재 기상, 해양, 환경 관측 장비와 구조물 계측장비, 등대, 디젤 발전기와 복합 발전기, 침입자 감시 장비 등이 설치되어 운용되고 있다(심 등, 2004).

이어도 관측기지는 Fig. 6에서 제시하고 있는 바와 같이 제주도 마라도 서남방 149km에 위치하여 하계에 우리나라 남해안을 내습하는 태풍 등의 극한 해양관련 정보를 실시간으로 획득할 수 있는 좋은 입지적 조건을 갖추고 있다고 할 수 있다. 이어도 관측기지에서의 실시간 자료는 통상 기상요소 전부와 대부분의 해상요소로서 수질 및 대기환경요소 등의 특별한 요소를 제외하고는 거의 모두 매 10분 간격으로 관측되어, 2003년 9월 태풍 매미의 내습에 있어서도 같은 간격의 상세한 관측이 이루어졌다.

본 연구에서는 이어도 관측기지에서 취득된 2003년 9월 한 달의 상세 파랑관측 자료를 이용하여 개량된 WAM 모형의 정밀도를 비교 분석하였다.

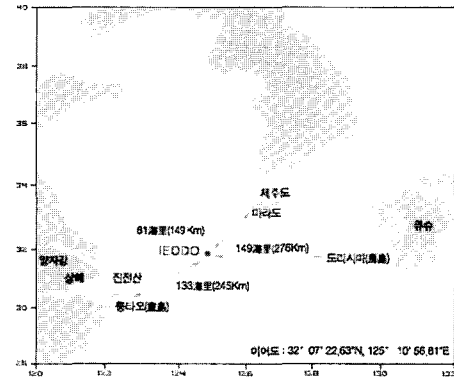


Fig. 6 Location of Ieodo

#### 3.2 입력 해상풍 자료의 특성과 모형의 계산 조건

해역에서의 파랑추산은 기본적으로 시간·공간적으로 변화하는 해상풍 정보의 연속적인 입력으로 파랑을 추산하게 되므로 모형 자체의 신뢰성뿐만 아니라 계산하고자 하는 공간 격자에 대한 해상풍의 정밀도가 파랑의 추산 정밀도를 좌우하게 된다. 지형의 영향을 받지 않는 대양에서는 1° 이상(약 100km 이상)의 큰 공간 격자 간격 내에 있어서도 어느 정도 동일 해상풍을 가정할 수 있지만, 연안 해역에서는 파랑의 추산 정밀도를 좌우하는 해상풍이 주변 지형의 영향으로 인해 복잡해지므로 보다 상세한 공간 스케일의 해상풍 데이터가 요구된다.

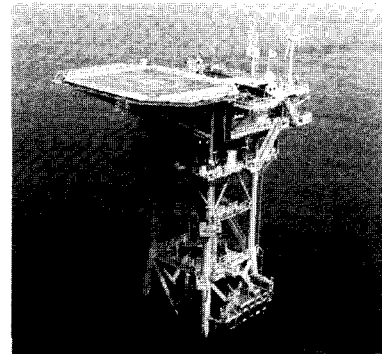


Fig. 7 Ieodo ocean research station

Table 1 Calculated conditions of the model

항 목	내 용	
좌표계 및 계산 영역	구면 좌표계(N 20~50°, E 110~160°)	
공간 격자	$\Delta x = \Delta y = 0.1^\circ$ (약 11km), 501×301개	
입력풍의 갱신	$\Delta x = \Delta y = 20$ km, 6시간 간격, $U_{10}$ (m/s)	
계산시간간격	$\Delta t = 360$ s, $\Delta t_s$ (Source합수계산간격) = 360s	
방향 스펙트럼	주파수영역(분할)	0.042~0.453Hz(배율1.1의 대수(log) 25분할)
	파향영역(분할)	0~360°( $\Delta\theta = 22.5^\circ$ , 16분할) - 수정파향배치

기상의 객관해석 자료의 하나인 해상풍 등을 제공하는 대표적인 기관에는 유럽의 ECMWF(European Center for Medium Range Weather Forecast), 미국의 NCEP(National Center for

Environment Prediction) 그리고 일본의 기상업무지원센터(Japan Meteorological Business Support Center, JMBSC)가 있다. 본 연구에서는 우리나라를 포함하는 동남아시아의 영역에 대해 20km 공간 격자간격의 기상 데이터를 별도 제공하는 JMBSC의 자료를 이용하여 매 6시간 간격으로 2003년 9월 1일~9월 30일의 해상풍 자료를 연속 입력하였다.

모형의 계산 조건은 Table 1에 제시한 바와 같이 N 20~50°, E 110~160°의 영역을 해상도 0.1°(약 11km)의 상세 격자로 분할하고 이에 따라 CFL 안정조건을 만족하는 360s의 시간 간격으로 계산하였다. 6시간 간격으로 입력되는 해상풍은 각 시간 간격에 맞추어 내삽되며, 계산 결과는 9월 한 달의 전 기간에 걸쳐 1시간 간격으로 출력하였다.

### 3.3 파랑관측 결과와 비교를 통한 계산 결과의 검증

Fig. 8은 이어도 관측기지에서 취득한 풍속 및 파랑의 관측

자료를 본 연구에서 적용한 수정 WAM 모형의 계산 결과와 비교한 것으로서 9월 2일 0:00부터 9월 30일 17:00까지를 1시간 간격으로 비교한 것이다.

그림에서 (a)는 모형에 입력된 풍속( $u^* = U_{10}\sqrt{C_D}$ )과 이어도 관측기지에서 관측한 풍속(U40; 높이 40m에서 측정한 풍속) 및 대기압을 제시하였고, (b)는 유의파고 및 주기에 대해 관측치와 계산치를 함께 나타낸 것이며, (c)는 파향을 비교한 것이다. 이중 유의파고, 주기 및 파향은 이어도 관측기지에 설치한 파랑 관측기의 검정과 방향스펙트럼의 관측을 목적으로 관측기지로부터 약 1.7km 떨어진 곳에 설치한 wave rider에서 취득된 자료이다(심 등, 2004).

Fig. 8(a)에 나타낸 바와 같이 이어도 관측기지에서 관측된 태풍 매미에 의한 기압 강하는 9월 12일 12:00에 최대로서 983.19hPa를 기록하였고, 풍속(U40)은 동일 시각 31.7m을 기록하였다. 한편, 본 모형에서 입력으로 사용한 해상풍인 JMBSC

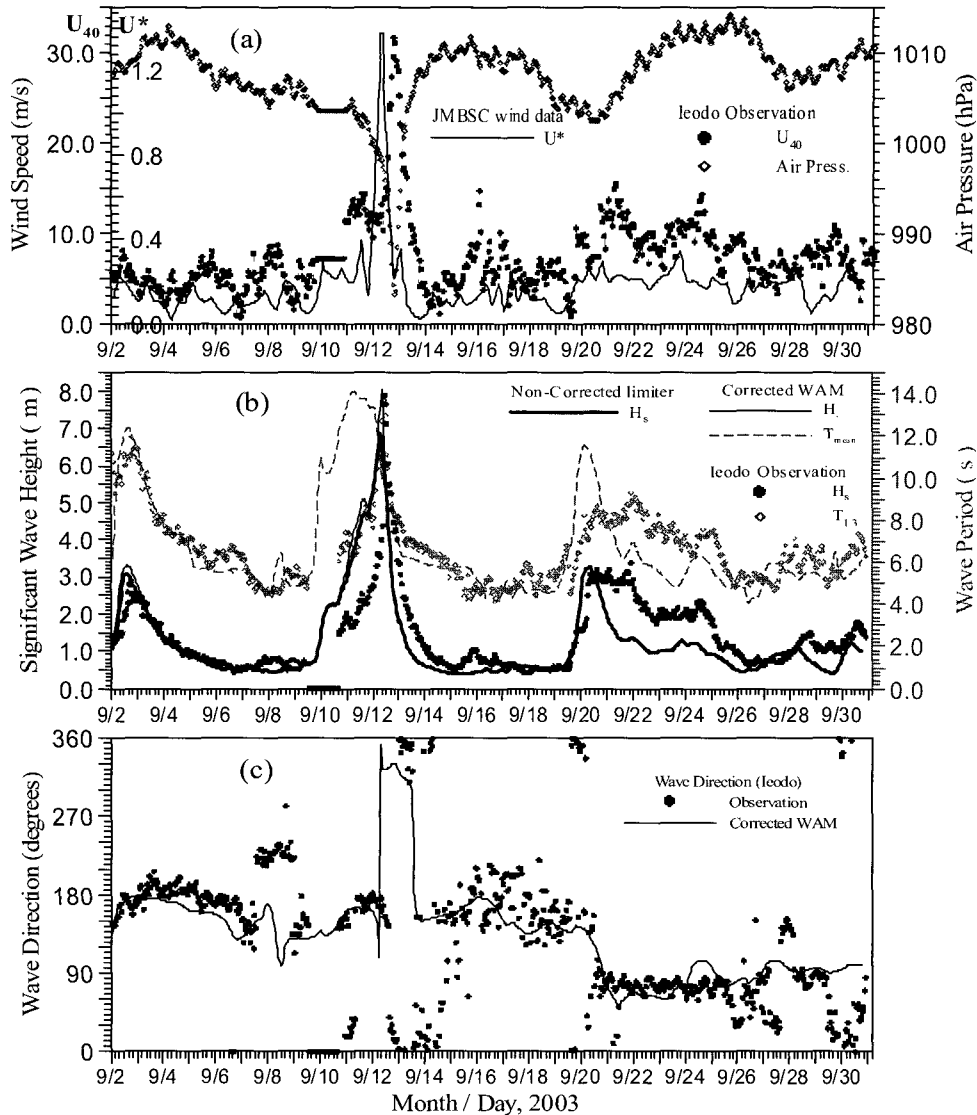


Fig. 8 Time series comparison of winds and wave components at Ieodo ocean research station (a) Winds and air pressures, (b) Wave heights and periods, (c) Wave directions

의 자료는 해면으로부터 10m의 풍속(U10)이므로 직접적인 비교는 어렵지만, 최대 풍속을 나타내는 시점이 9월 12일 06:00로서 이어도 관측기지에서의 기록보다 6시간 빠르다. 이 같은 입력 해상풍의 시간차는 Fig. 8(b)에 제시한 유의파고 계산 결과에도 그 영향이 나타나 태풍 매미 통과 시 파의 성장이 관측치보다 선행하여 일어나고 감소도 약간 빠른 형태로 나타나 해상풍의 정밀도가 파랑추산 결과에 직접적으로 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8(b)에는 관측된 유의파고, 주기와 수정 WAM 모형의 계산 결과를 비교하고 있다. 태풍 매미 통과 시에 있어서는 입력 해상풍의 시간차이로 인해 시간적인 어긋남이 나타나지만 9월 한 달의 전체를 비교하면 유의파고에 있어서 정밀도가 우수하다고 평가할 수 있으며, 주기의 경우는 모형에서 제시하는 평균 주기가 관측된 유의파 주기와 상관성이 좋은 것을 알 수 있다.

Fig. 8(b)에는 2.2절에서 제시한 파 발달에 대한 제한을 수정하지 않은 상태로 계산된 유의파고 결과를 함께 제시하고 있다. 전체적인 유의파고의 비교에 있어서 양자의 계산 결과는 거의 동일한 값을 제시하고 있으나, 9월 2 3일 및 12일의 최대치에서 차이를 발견할 수 있다. 이는 식 (4)의 수정되지 못한 제한을 적용함에 따라 상세한 공간 격자 및 시간 간격의 계산에 있어서 태풍의 진행과 더불어 급변하는 바람장에 대해 해당 시간 간격에 대한 파랑 에너지의 발달이 제한에 의해 일부 억제되어 나타난 결과로 사료된다. 특히 관측된 유의파고의 최대치는 9월 12일 10:00에 7.89m를 나타내고 있고, 수정된 WAM의 경우 같은 날 07:00에 최대치 8.02m로 양호한 결과를 제시하지만, 제한(limiter)를 수정하지 않은 결과에서는 같은 날 05:00에 최대치 6.88m로 약 1m를 과소평가하고 있다. 제한이 수정되지 못함으로 인한 이 같은 계산 경향은 파랑의 극한 상황에 대한 정보를 필요로 하는 해양 구조물 등의 설계에 있어서 바람직하지 못한 결과를 산출할 우려가 있어 주의가 요망되며, 따라서 정밀한 파랑 산출을 하고자 상세한 공간 격자를 도입하는 경우는 파랑의 원활한 발달을 위해 개량된 제한(limiter)의 도입이 필요함을 알 수 있다.

Fig. 9는 1시간 간격의 파랑 정보의 관측치와 계산치를 9월 한 달에 대한 동일 시간의 (a)유의파고, (b)주기 및 (c)파향에 대해 비교한 것으로서 결론된 관측치에 대한 비교를 제외시킨 657개의 데이터 수에 대해 상관도를 제시한 것이다. Fig. 9(a), (c)의 유의파고 및 파향에 있어서는 다소의 바이어스(bias)가 존재하지만 상관계수는 유의파고, 주기 및 파향에 있어서 상관계수는 0.769, 0.929, 0.783으로서 각각의 성분에 대해 관측치와 계산치의 상관은 양호한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 WAM 모형을 대상으로 파향 배치와 파 발달에 대해 부여된 제한식에 대해 상세히 검토하고 이를 수정하여 천해·상세 공간 격자에 대한 모형의 적용성을 확장하였다. 수정된 WAM 모형은 2003년 9월 한 달 동안에 대한 JMBSC의 해상풍 자료를 입력으로 파랑 제원을 계산하고 이어도 해양과학기술지에서 관측된 같은 달의 정밀 파랑관측 자료를 토대로 검증하였다.

본 연구에서의 검토를 통하여 공간 격자에 연한 방향을 피하는 경사 파향 배치를 채택함으로써 garden sprinkler effect로 인해 파랑 계산결과에 형성되는 이방성(異方性)이 개선됨을 확인하였으며, 정밀한 파랑 산출을 위한 상세 공간 격자에 대해서는 개량된 제한(limiter)의 도입이 필요함을 지적하였다.

본 연구의 결과는 후속 연구로 이어질 태풍 매미로 인한 남해안 일대의 극한 파랑 해석에 이용될 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 공공기술연구회의 지원으로 한국해양연구원에서 수행하는 기본연구과제인 “해양개발을 위한 설계엔지니어링 기술 고도화 연구” 및 과학기술부의 국제공동연구사업인 “극한파 특성의 비선형 해석 및 해양구조물 적용 연구”의 연구결과 중 일부입니다.

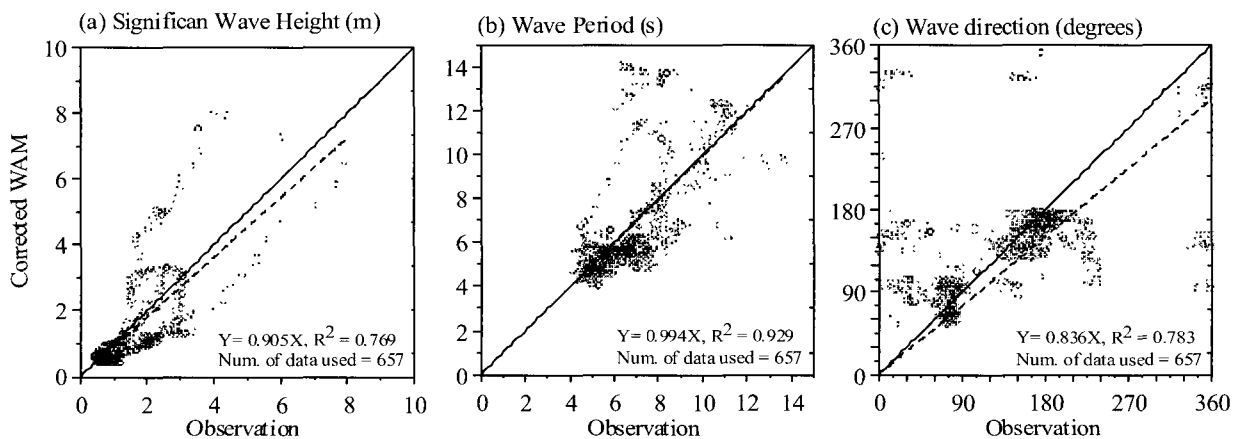


Fig. 9 Correlation diagrams of (a) significant wave heights, (b) wave periods and (c) Wave directions

## 참 고 문 헌

- [1] 신승호, Hashimoto, N.(2003), “선박의 항행안전지원을 위한 파랑추산에 관한 연구”, *한국항해항만학회지* 27권 2호, pp. 111-119.
- [2] 심재철, 이재학, 민인기 (2004), “이어도 해양과학기지에서 관측한 태풍 매미 자료분석” 2004년 한국해양·해양공학 발표논문집, pp. (인쇄 중).
- [3] 한동대학교 건설환경연구소 (2004), “울산신항 방향성 파고계 설치 및 유지관리·자료분석 연구용역 4차년도 보고서”
- [4] 問瀬 肇・平尾博樹・國富將嗣・高山知司 (2001), “SWANを用いた日本沿岸波浪推算システム構築と適用性の検証”, *日本土木學會 海岸工学論文集*, 48卷, pp. 236-240.
- [6] 増田 章・小松幸生 (2000), “波浪予報模型におけるエネルギー伝達項の数値處理に關するいくつかの試み”, *九州大學 力學シミュレーション研究センター案内實驗分野研究成果集* No.3, pp. 137-150.
- [7] Hasselmann, S., K. Hasselmann, Allender, J. H. and Barnett, T. P.(1985), “Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave model”, *J. Phys. Oceanogr.* 15, pp. 1378-1391.
- [8] Hersbach, H.(1998), “The adjoint of the WAM model”, *KNMI WR*, p. 28.
- [9] Hersbach, H. and Janssen, P. A. E. M. (1998), “Improvement of the Short-Fetch Behavior in the Wave Ocean Model (WAM)” *J. of Atmospheric and Ocean Technology*, Vol. 16, pp. 884-892.
- [10] Holthuijsen, L. H., N. Booij, R. C. Ris, I. J. G. Haagsma, A. T. M. M. Kieftenburg and E. E. Kriez (2000), “SWAN CycleIII version 40. 11, USER MANUAL”, *Delft University of Technology*, p. 124.
- [11] Janssen, P. A. E. M. (1991), “Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting”, *J. Phys. Oceanogr.* 21, pp. 1631-1642.
- [12] Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann and P. A. E. M. Janssen (1994), “Dynamics and Modelling of Ocean Waves”, *Cambridge University Press*, p. 532.
- [13] Suzuki, Y. (1995), “Development and application of a global ocean wave prediction model including nonlinear interactions and dissipation”, *Dr. Thesis, Univ. of Tokyo*, p. 182.
- [14] Tolman, H. L. (2002), “User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22”, *NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 222*, p. 133.
- [15] WAMDI group (1988), “The WAM model - a third generation ocean wave prediction model”, *J. Phys. Oceanogr.* 18, pp. 1775-1810.

원고접수일 : 2004년 6월 16일

원고채택일 : 2004년 8월 4일